Anleitung zum Physiologischen Praktikum

Sommersemester 2011

herausgegeben von den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern

des Instituts für Physiologie der Universität Duisburg-Essen

PHYSIOLOGISCHES PRAKTIKUM FÜR HUMANMEDIZINER 2011

Inhaltsverzeichnis

		Seite
	Vorbemerkungen	0.1 - 0.3
1 I	Neurophysiologie I: Elektroenzephalogramm (EEG), Evozierte Potentiale	1.1 – 1.10
1 II	Neurophysiologie II: Reflexe, Reaktionen und Elektrophysiologie des peripheren Nerven; Patellarreflex, H-Reflex, Reflexzeit, Reaktionszeit, Membranpotential, Nernst-Gleichung, Goldman-gleichung, Erregungsleitungsgeschwindigkeit, Refraktärverhalten, Blockade	1.11 – 1.20
2 I	Sinnesphysiologie I - Sprache, Gehör: Schallanalyse und Isophone, Audiometrie, Luft- und Knochenleitung, Frequenzbereich der Sprachverständlichkeit	2.1 – 2.20
2 II	Sinnesphysiologie II - Gesichtssinn: Perimetrie, Dunkeladaptation, Anomaloskop, Sehschärfe, Augenmodell, Akkommodationsbreite, Registrierung von Augenbewegungen	2.21 – 2.42
3	Blut: Venenpunktion / Blutentnahme, Blutsenkung, rotes Blutbild (Hämatokrit, Hb-Messung, Erythrozytenzählung) Blutgruppen, Blutungszeit, Blutungsstillung, Blutgerinnung, Osmotische Resistenz	3.1 – 3.20
4	Atmung und Energiehaushalt: O_2- und CO_2-Konzentration, Strömungsgeschwindigkeit und Volumen der Atemluft, Spirometrie im offenen System, Spirometrie im geschlossenen System, Ganzkörperplethysmographie	4.1 – 4.30
5 I	Niere / Elektrolyt- und Wasserhaushalt: Renale Verdünnungs- und Konzentrierfähigkeit, glomeruläre Filtrationsrate, Natrium- und Kalium-Clearance, fraktionelle Wasserresorption	5.1 – 5.12
5 II	Säure-Basen-Haushalt: Säure-Basen-Status des Blutes, renale Regulation des Säure-Basen-Haushalts	5.13 – 5.16
6	Herz: EKG, Vektor-EKG, Echokardiographie, Simulation von Herz-Kreislauf-Parametern	6.1 – 6.24
7	Kreislauf: Blutdruckmessung, orthostatische Kreislaufreaktion, Herzzeitvolumen, Pulswellengeschwindigkeit, Herztöne, Kreislaufmodelle, Plethysmographie	7.1 – 7.26
	Anhang A: Gerätebeschreibung (hier nicht enthalten; liegt aus)	A.1 – A.28
	Anhang B: Registriermethodik	B.1 – B.6
	Anhang C: Signaleigenschaften	C.1 – C.4

Praktikum der Physiologie

Ziel des Praktikums

Das Praktikum der Physiologie baut auf dem Lehrstoff der Vorlesung und des Seminars auf. Nach erfolgreicher Teilnahme am Praktikum sollen die Studierenden grundlegendes Wissen über die normalen Organfunktionen besitzen. Diese Kenntnis ist Voraussetzung für das Verständnis von Krankheiten und bildet die Grundlage einer Therapie.

Um das Praktikum erfolgreich zu absolvieren, ist es notwendig, gut vorbereitet zu sein, während der Praktikumsübungen aktiv mitzuarbeiten und in einer abschließenden Nachbesprechung zu zeigen, dass man die Wissensinhalte des Praktikumskapitels beherrscht.

Vorbereitung

Von jedem Studierenden ist für das Praktikum mitzubringen: Taschenrechner, Millimeterpapier (linear und halblogarithmisch), Notizpapier, Winkeldreieck, Schere, Lineal, Bleistift, Klebstoff und Farbstifte. Für die Praktikumsaufgaben Blut und Niere besteht die Verpflichtung, einen Kittel zu tragen. Besonders wichtig ist, dass die Studierenden durch entsprechende **Vorbereitung** auf den jeweiligen Praktikumsversuch das notwendige Grundwissen erworben haben.

Die Praktikumsvorschrift, deren Kenntnis vorausgesetzt wird und auch zum Bestehen der Eingangstestate notwendig ist, berücksichtigt im Wesentlichen nur methodische Aspekte; das für das Verständnis unumgängliche Basiswissen muss daher aus weiteren Quellen erarbeitet werden (Wissensstoff aus Vorlesung, Seminar und Lehrbüchern; Verweis auf die entsprechenden Kapitel der gängigen Standardlehrbücher jeweils am Beginn der Praktikumsbeschreibung). Die Angabe thematischer Stichworte soll helfen, das für das Versuchsverständnis wichtige Sachgebiet zu skizzieren.

Erläuternde Fallbeispiele sind nach Anregung durch das Praktikumsskript des Physiologischen Instituts der Universität Münster an den Beginn der jeweiligen Kapitel gestellt worden.

Organisation

Das Physiologiepraktikum ist ganztägig. Es findet für die erste Hälfte der Studierenden (Kurs A) dienstags und für die zweite Hälfte (Kurs B) donnerstags statt. Jeder Kurs umfasst 8 Gruppen zu je 2 Halbgruppen I und II (im Zeitplan entsprechend als A 1/I + II bis A 8/I + II bzw. B 11/I + II bis B 18/I + II gekennzeichnet). Jede Gruppe führt nach beiliegendem Zeitplan an jedem Praktikumstag einen der insgesamt 7 Versuche durch.

An den jeweiligen Praktikumstagen befassen sich die Gruppen mit jeweils verschiedenen Versuchen. Jeder Versuch besteht dabei aus Halbtagsaufgaben I und II, für die jeweils eine bzw. mehrere Versuchsanordnungen zur Verfügung stehen. Der Versuchsablauf ist infolgedessen so organisiert, dass die zwei Halbgruppen jeder Gruppe diese Halbtagsaufgaben umschichtig durchführen.

Das Praktikum beginnt um **9 Uhr c.t.** Zu dieser Zeit versammeln sich alle Teilnehmer in der Regel zum Eingangs-Testat in den Räumen des jeweiligen Versuchs; anschließend beginnen die Vormittagsversuche. Nach der Mittagspause um **ca. 13 Uhr** wird mit den Nachmittagsversuchen fortgefahren, an die sich das Schlusstestat zur Vorlage der Versuchsergebnisse und Erläuterung anschließt. Um **ca. 17 Uhr** beginnt das Seminar „Gestörte Organfunktionen“, für das ebenfalls Anwesenheitspflicht besteht.

Die Räume für die Versuche befinden sich im Praktikumsbereich im Erdgeschoss. Die Raumnummern sind ebenfalls dem Zeitplan zu entnehmen.

Verhalten am Arbeitsplatz

Bitte kommen Sie pünktlich und, wenn notwendig, mit Schutzkleidung (weißer Kittel; Praktika Blut und Niere) zum Kurs. Unterlassen Sie das Rauchen und Essen in den Kursräumen einschließlich des Flurbereichs. In Praktika, in denen Untersuchungen von Blutproben erfolgen, müssen Schutzhandschuhe getragen werden! Einige Apparate dürfen nur vom Institutspersonal bedient werden; dies ist in den betreffenden Versuchsanleitungen angegeben. Behandeln Sie die Geräte schonend und probieren Sie bei Zweifeln über die Bedienung nicht herum, sondern vergewissern Sie sich nochmals in der Praktikumsvorschrift und fragen dann das Personal! Einen großen Teil der Aufgaben führen die Studierenden gegenseitig an sich selber durch. Es ist daher notwendig, streng nach den Vorschriften zu verfahren. Jede Praktikumsgruppe bringt am Ende des Versuches ihren Arbeitsplatz wieder in einen aufgeräumten Zustand. Das Spülen von Glasgefäßen und Reinigen von Apparaturen soll nur nach Anweisung des Institutspersonals erfolgen.

Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse

Die Versuchsprotokolle sind während des Praktikums auszufüllen und dienen als Dokumentation für die eigenhändige Durchführung der Versuche und als Grundlage für die Ergebnisdiskussion im Rahmen des Schlusstestats.

Die Anerkennung der regelmäßigen und erfolgreichen Teilnahme am Praktikum zur Erlangung des Scheines „Praktikum der Physiologie“ setzt voraus:

1. die regelmäßige Teilnahme an 6 der 7 Praktikumstage.
2. das Erlangen von maximal 3 Punkten je Praktikumstag, die als Leistungsnachweis für die praktischen Übungen dienen. Diese Punkte können erlangt werden durch
   a) das Bestehen des Eingangstestats (1 Punkt),
   b) die Durchführung aller Versuche und Führen eines richtigen und vollständigen Versuchsprotokolls (1 Punkt),
   c) das Bestehen des Schlusstestats mit adäquater Erläuterung der durchgeführten Versuche (1 Punkt),
3. das Bestehen eines mündlichen Testats zur Mitte des Praktikums (maximal 5 Punkte),
4. das Bestehen einer Abschlussklausur.

Zu 1): Regelmäßige Teilnahme

Die **regelmäßige, ganztägige Anwesenheit** ist Voraussetzung für die Zulassung zur Abschlussklausur bzw. Nachholklausur. Fehltage können nur mit ärztlicher Bescheinigung und nur nach Vereinbarung eines Ersatztermins nachgeholt werden.

Zu 2a): Im **Eingangstestat** wird zu Anfang eines jeden Praktikumstages mündlich das für den anstehenden Versuch wesentliche (auch methodische) Basiswissen aus der Vorlesung, dem Lehrbuch und der Praktikumsvorschrift geprüft.

Zu 2b): Vordrucke für das **Versuchsprotokoll** befinden sich in der Praktikumsanleitung. Jeder Praktikumsteilnehmer muss für jeden Versuch ein solches Protokoll führen. In die Vordrucke sind während des Praktikums die Messdaten und, wenn gefordert, Erläuterungen zu den Ergebnissen einzutragen. Die Vollständigkeit und Richtigkeit der Protokolle wird von den Praktikumsbetreuern überprüft.

Zu 2c): Das **Abschlusstestat** findet jeweils anschließend an den Versuch in der Regel in den Praktikumsräumen im Erdgeschoss statt. In diesem Rahmen werden die Messergebnisse testiert und daran anknüpfende Fragen gestellt. Ein mündliches Nachtestat zu einzelnen Praktikumstagen findet **nicht** statt.

Zu 3): Zur Mitte des Praktikums muss sich jeder Teilnehmer einem **mündlichen Testat** zu den bis dahin absolvierten Versuchen unterziehen. Dazu werden rechtzeitig Listen ausgehängt, denen die Versuche sowie Prüfer, Raum und Termin zu entnehmen sind. Die Leistung im Testat wird mit maximal 5 Punkten bewertet. Bei Vorlage einer Krankmeldung kann ein versäumtes Testat nach Terminabsprache nachgeholt werden. **Dieses Testat müssen nur Studierende der Medizin absolvieren!**

Zu 4): Bestehen einer **Abschlussklausur**

Am Ende des Praktikums müssen alle Teilnehmer an einer Abschlussklausur mit 40 Multiple-Choice-Fragen teilnehmen.

Studierende der Medzin:

Zur Erlangung des Scheines sind mindestens 47 Punkte erforderlich: 24 P. (entsprechend 60 % richtig beantworteter Fragen) aus der Klausur, 23 P. aus den Praktikumstagen und dem Testattag. Fehlende Punkte aus dem Praktikum und dem Testattag müssen durch entsprechend mehr richtig beantwortete Fragen in der Klausur ausgeglichen werden. Diese Regelung gilt auch für die 1. Nachholklausur!

Nur Studierende, die an **mindestens 6 der 7 Praktikumstage und dem Testattag** teilgenommen haben, werden zur Abschlussklausur und evtl. Nachholklausur nach Ende des Praktikums zugelassen. Für alle anderen Studierenden wird das Praktikum als Fehlversuch gewertet; sie können jedoch an der Wiederholungsklausur am Ende des folgenden Wintersemesters (und ggfs. weiteren Klausuren) teilnehmen, ohne das Praktikum wiederholen zu müssen. Diese Klausur ist eine weitere Möglichkeit, den Praktikumsschein zu erlangen, wenn Abschlussklausur und Nachholklausur nicht bestanden wurden.

Studierende anderer Fachrichtungen:

Um zur Klausur zugelassen zu werden, müssen 18 Punkte an den Praktikumstagen erworben werden. Die Punkte aus dem Praktikumstagen werden für die Klausur nicht berücksichtigt. Das Praktikum ist bestanden, wenn mind. 50 % der Fragen richtig beantwortet wurden. Diese Regelung gilt auch für die 1. Nachholklausur!

NEUROPHYSIOLOGIE

I. Elektroenzephalogramm (EEG), Evozierte Potentiale (EP)

GK 19.2.2

Lehrbücher: Speckmann / Hescheler, Köhling, 5. Aufl., Kap. 5
Klinke / Pape / Kurtz / Silbernagl, 6. Aufl., Kap. 26
Schmidt / Lang / Heckmann, 31. Aufl., Kap. 8

Fallbeispiel: Ein 24-jähriger Redakteur einer Zeitung klagt gegenüber Mitarbeitern, dass die Buchstaben beim Lesen vor seinen Augen verschwimmen. Er führt das auf Ermüdung zurück. Am nächsten Morgen hat sich sein Sehvermögen aber weiter verschlechtert. Wie durch einen Schleier nehme er die Welt war, erzählt er einem Augenarzt, den er verängstigt aufgesucht hat. Außerdem kribbeln seine Beine zunehmend, als ob Ameisen über die Haut laufen. Der Augenarzt findet beim Augenspiegeln eine „temporale Abblassung der Papilla nervi optici", ein Zeichen einer Entzündung von Fasern des Nervus opticus. Das veranlasst ihn, den Patienten mit der Vermutungsdiagnose „Multiple Sklerose", einer entzündlichen Erkrankung des Zentralen Nervensystems, an einen Neurologen zu überweisen. Dort wird der Patient gründlich neurologisch untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchung registriert der Neurologe nach einem EEG auch visuell evozierte Potentiale und findet nach Blitzlichtstimulation eine Latenzzunahme von Potentialschwankungen im Bereich des visuellen Kortex, die auf einer verminderten Leitungsgeschwindigkeit der Nervenfasern vom Auge zum visuellen Kortex beruhen. Solche Latenzverlängerungen reizevozierter Potentiale finden sich bei mehr als 80 % der Patienten mit klinisch gesicherter Multipler Sklerose (MS). Auf Grund des klinischen Bildes, des augenärztlichen Befunds und der VEP-Untersuchungsergebnisse wird der Patient in eine Neurologie eingewiesen. Dort wird nach Untersuchungen des Liquors, auf Grund von NMR-Bildern des ZNS u. a. die Diagnose MS bestätigt und eine Hochdosis-Cortison-Therapie begonnen.

Aufgabe:

i. a, b Registrierung spontaner und reizevozierter Potentiale von der Schädeloberfläche des Menschen.

ii. Auswertung verschiedener EEG-Registrierungen und eines visuell evozierten Potentials anhand von Beispielen aus der Datenbank des Computers.

Stichworte:

Elektroenzephalogramm: Ableitungsschema, Auswertmethoden, Frequenzanteile, Einfluss des Aktivitätszustandes; Erregungsausbreitungsgeschwindigkeit in zentralen Strukturen; Evozierte Potentiale: Auslösung, Registrierung, Verlaufsphasen und topographische Zuordnung, Darstellung durch reizsynchronisierte Mittelungsverfahren; Objektive Audiometrie.

Vorbemerkungen:

Von der Kopfhaut lassen sich Potentialschwankungen mit einer Amplitude von bis zu 200 µV ableiten, die in der Hirnrinde entstehen und als Elektroenzephalogramm (EEG) bezeichnet werden. Das EEG ist vor allem auf Ströme zurückzuführen, die in postsynaptischen Membranen von vertikal im Neokortex angeordneten Neuronenpopulationen entstehen. Damit ist das Muster der EEG-Potentialschwankungen Spiegelbild des Signalzustromes zum Neokortex. Dieser Zustrom kann - z. B. auf Grund kortikothalamischer Schaltkreise periodisch moduliert werden. So werden im wachen Zustand bei geschlossenen Augen oder

bei geringer visueller Aufmerksamkeit vor allem im occipitalen und parietalen Bereich sinusförmige (8 - 13 Hz) Potentialschwankungen beobachtet, die als α-Wellen bezeichnet werden. Beim Öffnen der Augen und bei visueller Aufmerksamkeit wird der α-Rhythmus sofort blockiert und teilweise durch einen höherfrequenten β-Rhythmus (13 - 40 Hz) ersetzt. Umgekehrt werden beim Einschlafen transiente ϑ-Wellen (4 - 7 Hz) beobachtet, die schließlich im Tiefschlaf in δ-Wellen (1 - 3 Hz) übergehen können. Die Amplitude der EEG-Wellen wird vor allem (1) vom Ausdehnungsgrad und (2) der Intensität der Afferenzen sowie (3) ihrer Synchronisation, aber auch (4) vom Erregungsniveau der nachgeschalteten Neurone bestimmt. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die EEG-Wellen im Tiefschlaf bei geringem mittleren Erregungsniveau und damit großer „Verfügbarkeit" für die Einbindung in rhythmische Prozesse oft eine besonders hohe Amplitude aufweisen.

Wird ein sensorischer Eingang stimuliert, so löst die Signalafferenz zum Neokortex zusätzliche „evozierte" Potentiale (EP) aus, deren Amplituden etwa 10mal kleiner sind als die des spontanen EEG. Um die oft vom spontanen EEG verdeckten EP hervorzuheben, bietet es sich an, EEG-Epochen zu mitteln, die z. B. mit dem Reiz starten. Da das zunächst dominierende spontane EEG in zeitlicher Beziehung zum Reiz zufällig verteilt ist, während die reizinduzierten EP in strenger zeitlicher Beziehung zum Reiz ablaufen, wird das Summensignal des spontanen EEG bei der Mittelung der EEG-Epochen zunehmend kleiner. Die evozierten Potentiale, die in Latenz und konstanter Form auf den Reiz folgen, werden durch die Summierung der stets gleichphasigen Signalkomponenten dagegen stetig größer.

Geräte:

zu i. a: 8-Kanal-Elektroenzephalograph zur Registrierung von EEG-Wellen, Gummiband, AgAgCl-Elektroden und Leitpaste

zu i. b: PC-gestützte Versuchsanordnung zur Ableitung und Auswertung des EEG: Gummiband, AgAgCl-Elektroden und Leitpaste, 2-Kanal-EEG-Vorverstärker, Analog-Digital-Konverter, Personalcomputer mit Monitor zur Kurvendarstellung, 1 Blitzlampe zur visuellen Stimulation.

zu ii: Personalcomputer für die Auswertung der Signale aus der Datenbank.

i. Registrierung und Auswertung spontaner und evozierter Potentiale am Menschen

Im Praktikum werden spontane EEG-Wellen und Potentiale der Hirnrinde bei visueller Reizung durch Lichtblitze registriert. Das spontane EEG wird mit einem EEG-Schreiber, das visuell evozierte Potential (VEP) mit einem 2-Kanal-EEG-Verstärker aufgenommen. Potentiale werden mit AgAgCl-Elektroden abgeleitet, die entsprechend dem 10/20 Schema auf der Kopfhaut positioniert sind (s. Abb. 1.1). Zur Registrierung der VEP werden die EEG-Wellen anschließend digitalisiert, mit einem PC dargestellt und gemittelt. Am Bildschirm dieses PC ist zu verfolgen, wie das spontane EEG bei zunehmender Summierung der EEG-Epochen immer weiter an Amplitude abnimmt, während die EP mit ihren zahlreichen Komponenten nach etwa 30 Mittelungen deutlich hervortreten. Da die einzelnen Komponenten innerhalb der ersten 100 ms Erregungsausbreitungen im ZNS widerspiegeln, kann der Neurologe aus diesen Signalen u. a. Leitungsgeschwindigkeiten des Sehnervs und des Tractus opticus ableiten und diagnostisch verwerten.

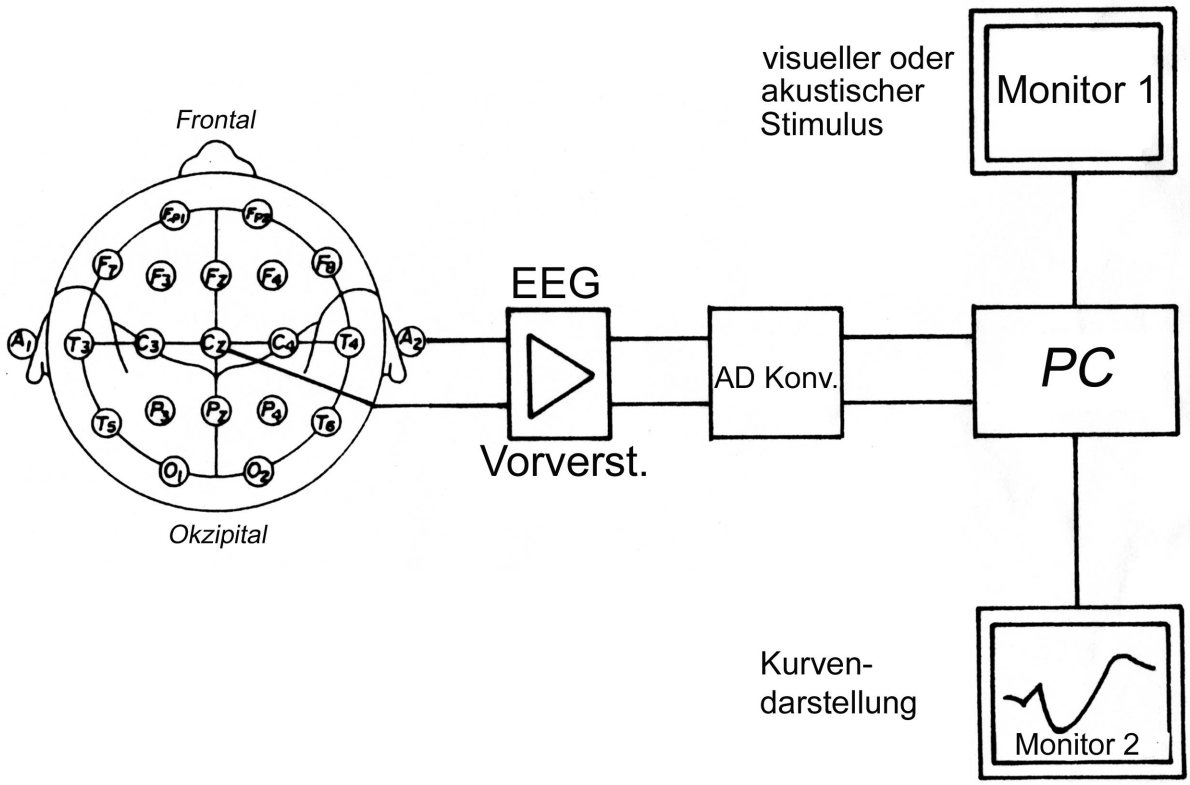


Abb. 1.1 EEG-Ableitschema (Internationales „ten-twenty system") und die Geräteanordnung zur Registrierung evozierter Potentiale im Praktikum. AD-Konv.: Analog-Digital-Konverter; PC: Personal-Computer

i. a) Versuchsverlauf: EEG Registrierung

Eine Versuchsperson setzt sich in einen bequemen Sessel. Entsprechend dem 10/20 Schema werden vom Versuchsleiter 6 AgAgCl-Elektroden an den Positionen Fp2, F8, T4, T6, O2, O1 auf die Kopfhaut gesetzt und mit einem Gummiband fixiert. An einem Ohrläppchen wird eine indifferente Elektrode befestigt. Die Elektroden sind mit Stoff überzogen, der mit Ringerlösung getränkt ist. Damit soll ein möglichst niederohmiger Kontakt zwischen Elektrode und Kopfhaut erreicht werden (wenige kOhm). Nachdem die Elektroden mit dem Eingangsverstärker des Elektroenzephalographen verbunden worden sind, werden mit Programm 1 des Geräts EEG-Wellen unipolar – (differente gegen indifferente Elektrode) – sowie mit Programm 5 bipolar abgeleitet. Als Zeitkonstanten der Eingangsverstärker werden 0,03, 0,1 und 0,3 s gewählt. Als obere Grenzfrequenz werden wahlweise 70, 30 und 15 Hz eingestellt. Die Wahl der Zeitkonstanten und der oberen Grenzfrequenz ist in den Eichmarken wieder zu erkennen, die durch 50 oder 100 µV große Rechtecksignale am Eingang entstehen. Schreiben Sie die Eichsignale bei verschiedenen Zeitkonstanten und verschiedenen oberen Grenzfrequenzen heraus.

Bei welchen Zeitkonstanten können Sie δ-Wellen registrieren?

Bei welcher oberen Grenzfrequenz sehen Sie β-Wellen?

Wie verändert sich das EEG bei Schließen der Augen?

Wie unterscheiden sich uni- und bipolar registrierte EEG-Wellen in ihrer Frequenz?

Können Sie auswertbare evozierte Potentiale im EEG nach akustischer oder visueller Stimulation (Blitzlicht o. ä.) auslösen?

Kleben Sie bitte Registrierbeispiele der α-Blockade bei Öffnen der Augen ein!

i. b) Versuchsverlauf: Evozierte Potentiale

Eine Versuchsperson stellt sich für die Registrierung von VEP zur Verfügung. Von den Ableitpunkten O1 und O2 werden unipolar kortikale Potentiale gegen das Ohr abgeleitet. Von einem Computer werden Blitze im Abstand von 1 s ausgelöst und die auf den Blitz folgenden kortikalen Signale mit 500 Hz digitalisiert und in 500 ms langen Epochen aufgezeichnet. Durch die Summierung der Potentiale von 40 Epochen löschen sich die nicht reizkorrelierten Potentiale gegenseitig weitgehend aus, während die reizkorrelierten Potentiale deutlich hervortreten. Am Ende der Registrierung werden VEP mit charakteristischen Formen, Amplituden und Latenzen sichtbar, die wir für Sie ausdrucken und die Sie bitte auswerten.

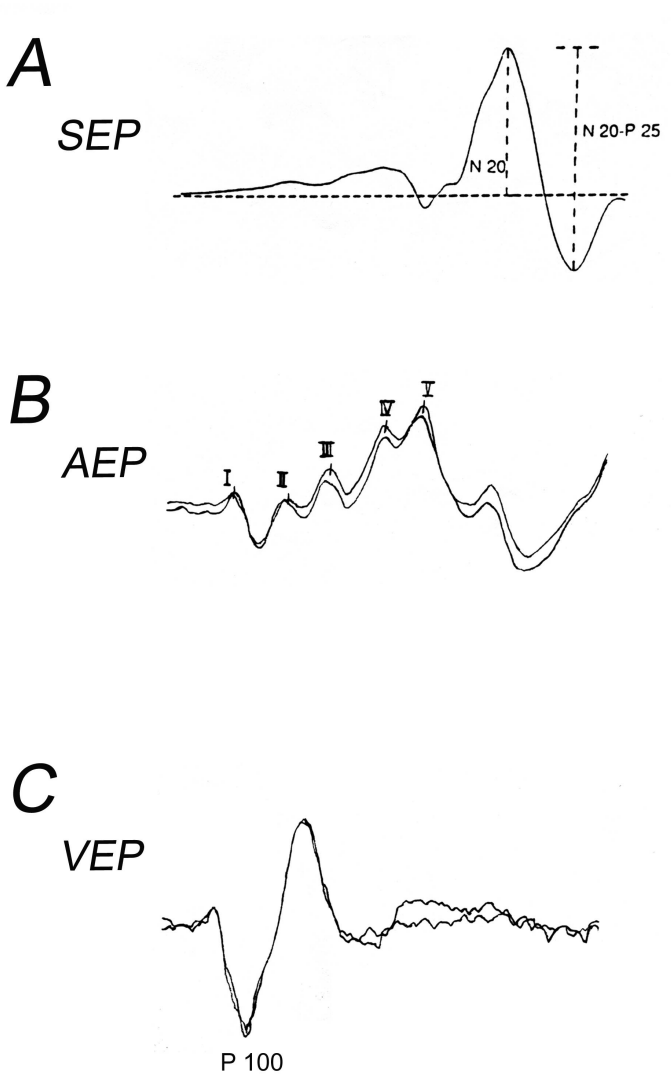


Abb. 1.2 Beispiele evozierter Potentiale

A: Sensorisch evoziertes Potential (SEP), nach kontralateraler elektrischer Reizung des N. medianus. Abl.: F3/A1, Reizdauer 0,1 ms, dreifacher Schwellenreiz. Anzahl der Mittelungen (Avg.) 128. El. Stim.= Stimulus = Reiz

B: Frühe Potentialkomponenten eines akustisch evozierten Potentials (AEP), die vor allem die Erregungsausbreitung im Hirnstamm widerspiegelt. Abl.: Cz/A2 u. Cz/A1, Stim. 80 dB. Anzahl Avg. 2000.

C: Visuell evoziertes Potential (VEP). Abl.: O2/Fz.und O1/Fz., Anzahl Avg. 60 und O1/Fz.

ii. Auswertung von Registrierungen aus der Datenbank des Computers

Diese Programme und ein Teil der Beschreibungen sind vom Physiologischen Institut der Universität Kiel übernommen (Prof. Dr. M. Illert, Dr. H. Wiese und Dipl.-Phys. U. Wolfram).

Aufgabenverteilung

Die Auswertungen werden von den Mitgliedern der Gruppe gemeinsam erarbeitet.

a) EEG-Auswertung (Programmteil Elektroenzephalographie)

Signalarten, Darstellung

Es werden folgende Registrierungen angeboten:

A Amplitudeneichung
B Einstreuung physiologischer Signale: Augenbewegung
C " " " : EMG
D α-Wellen: Frequenz und Amplitude
E β-Wellen: " " "
F Desynchronisation: visuell
G " : akustisch
H " : mental
I Habituation
J Epilepsie
K Schlaf-EEG: Einschlafstadium
L " : Vertexzacken
M " : Schlafspindeln
N " : Weckreaktion

Mit den angegebenen Buchstaben können Sie die Aufgaben aufrufen und durchführen.

Der Bildschirmaufbau erfolgt nach einem standardisierten Schema:

Von oben nach unten werden vier EEG-Kurven von folgenden Elektrodenpositionen angeboten: Fp_2(F), C_4(C), P_4(P), O_2(O); die angegebenen Abkürzungen finden Sie links und rechts auf dem Schirm. Die kleinen senkrechten Striche unter der occipitalen Ableitung markieren jeweils eine Sekunde. Oberhalb der frontalen Ableitung sehen Sie eine Linie, auf der mit hellen Balken, Dreiecken oder Strichen die Perioden markiert sind, in denen der Proband, dessen EEG Sie auswerten, externen Sinnesreizen ausgesetzt war oder Aufgaben zu lösen hatte. In dem rechteckigen Fenster im unteren Teil des Schirms finden Sie Kurzfassungen der von Ihnen durchzuführenden Mess- oder Beobachtungsaufgaben. Anweisungen zur Bedienung des Programms finden sich in der Zeile unterhalb des rechteckigen Fensters. Bei den meisten Aufgaben beträgt die zur Auswertung angebotene Ableitperiode eine bis zwei Minuten. Diese Zeitspanne kann nicht mehr in einem Stück auf dem Bildschirm dargestellt werden, weshalb die Ableitung kontinuierlich von rechts nach links auf dem Bildschirm an Ihrem Auge vorbeigeschoben wird (wie es ja auch der Situation im Experiment mit dem Tintenschreiber entspricht). Dieses Vorbeischieben kann jederzeit durch Betätigung der Leertaste gestoppt werden. Sie sollten sich aber erst einmal die gesamte Ableitung ansehen und in einem zweiten Durchgang ("A" startet die Ableitperiode erneut) die aufgegebenen Messungen durchführen.

Eine der Ableitungen können Sie mit den Tasten F, C, P, O in der Amplitude vergrößert darstellen.

Mit "E" springen Sie ans Ende der Ableitperiode. Die Richtung des Vorbeischiebens kann mit Taste "R" geändert werden, nachdem die Anzeige angehalten wurde.

Auswertaufgaben

1) Amplitudeneichung (A)

In dieser – zuerst durchzuführenden – Aufgabe wird die Potentialeichung aller Signale durchgeführt. Die Ausschläge entsprechen einem definierten Eichsignal einer Amplitude von 100 μV.

2) Einstreuung physiologischer Signale in das EEG: Augenbewegungen (B)

Auf der obersten Linie sehen Sie die Augenbewegungen markiert, Linie nach oben bedeutet Bulbus nach rechts (1-8) bzw. nach oben (9-15) bewegt und gehalten, Linie nach unten bedeutet Bulbus nach links (1-8) bzw. nach unten (9-15) bewegt und gehalten. Suchen Sie innerhalb der Sequenzen 9-15 in der frontalen Ableitung (F) ein deutliches Potential und messen Sie in allen Ableitungen die entsprechenden Amplituden dieses Potentials.

3) Alpha-Wellen (D)

In diesem Datensatz wird eine Ableitung mit überwiegender Alpha-Aktivität dargestellt (In welcher der Ableitungen tritt die Alpha-Aktivität am häufigsten und mit den größten Amplituden auf?). Wählen Sie mit der Cursorfunktion die entsprechende Ableitung an, markieren Sie wie dort beschrieben vier Perioden von je 1 s Dauer und führen Sie folgende Auswertungen durch:

- Zählen Sie in einer Periode von 1 s Dauer die Zahl der α-Wellen. Wiederholen Sie diese Messungen für die drei anderen von Ihnen ausgewählten Perioden (insgesamt 4 Messperioden).
- Berechnen Sie den Mittelwert der Frequenz.
- Vergleichen Sie den Mittelwert mit dem Frequenzmittelwert der β-Wellen in Aufgabe 4.
- Der Rechner bestimmt für Sie jeweils den Amplitudenmittelwert der vier Bereiche.

4) Beta-Wellen (E)

Dieser Datensatz stellt in der oberen Ableitung eine Messperiode mit deutlicher α-Aktivität dar. In den drei unteren Ableitungen – die nicht wie bisher zeitlich synchron mit der oberen aufgenommen wurden, sondern zu unabhängigen Zeitpunkten – sind Perioden mit überwiegender β-Aktivität wiedergegeben. Die beiden senkrechten Striche markieren 1 s. Messen Sie für jede Ableitung die Anzahl der Wellen pro Sekunde und berechnen Sie aus den Werten den Mittelwert der β-Frequenz. Vergleichen Sie ihn mit dem Wert für die α-Wellen in Aufgabe 3.

5) Desynchronisation durch Lichtreiz (F)

In diesem Datensatz wird eine Desynchronisation des EEG durch einen visuellen Eingang wiedergegeben. Auf der Spur oberhalb der frontalen Ableitung sind Zeitpunkt und Dauer der Augenöffnung angegeben (am Beginn der Ableitung sind die Augen geschlossen). Messen Sie die Latenz vom Lichtreizbeginn bis zur α-Blockade in F und 0.

Fragen:

- Ist die Desynchronisation in den verschiedenen Ableitungen gleich?
- Können Sie angeben, wann der Proband die Augen bzw. die Augenlider bewegt hat?
- Welche Wellenarten treten in den synchronisierten und desynchronisierten Perioden auf?

6) Epileptische Potentiale (J)

Messen Sie gemäß der Anweisung die höchste Potentialamplitude, die mittlere Frequenz der „spike and wave"-Komplexe, die mittlere Frequenz und Amplitude der Grundaktivität.

7) Schlafspindeln (K)

Messen Sie gemäß der Anweisung die mittlere Frequenz und Amplitude der Spindeln sowie die mittlere Frequenz der Grundaktivität.

8) Einstreuung physiologischer Signale: Bissbewegungen (C)

Auf der Spur oberhalb der frontalen Ableitungen sind willkürliche Bissbewegungen des Probanden markiert. In einer ersten Periode wurde der Proband aufgefordert, mit wechselnder Kraft zu beißen, in einer zweiten Periode von schwach ausgehend mit zunehmender Kraft.

Fragen:

- In welcher Ableitung sind die EMG-Signale am größten?
- Treten die Potentiale gleichzeitig in den verschiedenen Ableitungen auf?
- Wie ist die Beziehung zwischen Bissstärke und Amplitude der EMG-Wellen?
- Wie unterscheiden sich die EMG-Einstreuungen von den EEG-Wellen (Amplitude, Frequenz)?

9) Desynchronisation: Schallreiz (G)

In diesem Datensatz wird eine Desynchronisation des EEGs durch einen akustischen Eingang wiedergegeben. Auf der Spur oberhalb der frontalen Ableitung sind die Zeitpunkte des zweimaligen kurzen Händeklatschens mit einem kleinen Balken angegeben (die Augen sind geschlossen).

Fragen:

- Ist die Desynchronisation in den verschiedenen Ableitungen gleich?
- Zum Zeitpunkt des Händeklatschens sehen Sie in einigen Ableitungen Potentiale. Wie könnte man diese Potentiale erklären?

10) Desynchronisation: Aufmerksamkeit (H)

In diesem Datensatz wird eine Desynchronisation des EEG durch eine mentale Funktion wiedergegeben. Der Proband hatte die Augen geschlossen und war entspannt (ausgeprägter α-Rhythmus in allen Ableitungen). Mit dem Balken oberhalb der frontalen Ableitung ist der Zeitpunkt markiert, zu dem eine komplizierte Rechenaufgabe gestellt wurde (497 x 92,5). Das EEG geht sofort in eine Desynchronisation über. Das Ende des Balkens markiert die Aufforderung, mit der Rechnung aufzuhören. Etwa 4 s später treten in den C, P und O Ableitungen wieder α-Wellen auf (Entspannung).

Fragen:

- Ist die Desynchronisation in den verschiedenen Ableitungen gleich?
- Während des Kopfrechnens sehen Sie in der frontalen Ableitung Potentiale; wie erklären Sie diese?

11) Habituation (I)

In diesem Datensatz wird die Habituation des EEG auf einen regelmäßig wiederkehrenden akustischen Eingang dargestellt. Auf der Spur oberhalb der frontalen Ableitung sind Zeitpunkt und Dauer der Tonsalven angegeben (die Augen sind geschlossen). Im ersten Teil der Aufgabe werden die Tonsalven nacheinander dargestellt, wie sie im Versuch dem Probanden tatsächlich angeboten wurden. In dem zweiten Teil, der nach dem ersten Teil mit der Taste „T" angewählt werden kann, sind zur Verdeutlichung aus der occipitalen Ableitung die EEG-Antworten auf acht sukzessive Tonsalven untereinander dargestellt. Die Antworten sind in ihrer zeitlichen Abfolge nummeriert. Die senkrechten Striche zeigen Beginn und Ende der Tonsalven in den einzelnen Ableitungen.

Fragen:

Warum lassen sich folgende Aussagen zu den einzelnen Ableitungen machen?

zu 1: Die Tonsalve wird vom ZNS als einzelnes Ereignis bewertet;

zu 2: Das ZNS interpretiert die Salve anders;

zu 3: Das ZNS antizipiert die Salve;

zu 4: Das ZNS realisiert die Wiederholung und ist in einer langanhaltenden Interpretation begriffen;

zu 5: Das ZNS hat die Salve als belangloses Signal eingestuft, die Information wird nochmals überprüft;

zu 6-8: Die Aufmerksamkeit ist vom ZNS von dem Tonsignal weggenommen worden.

b) EEG-Auswertung (Programmteil Evozierte Potentiale)

Nach Aufruf dieses Simulationsprogramms zeigt Ihnen der Teil (A), wie EP durch Mittelung (Averaging) zunehmend deutlicher in charakteristischer Form aus der nicht-reizkorrelierten spontanen Hintergrundsaktivität herausgehoben werden. (B) gibt visuell evozierte Potentiale in den Ableitungen F - O wieder.

Aufgaben

1) Zu Programmteil (A): Führen Sie die Darstellung des evozierten Potentials durch zunehmende Mittelung durch. Versuchen Sie, einzelne EP in der aktuellen Ableitung zu erkennen.

Warum zeigen Einzel-EP bei wachen Personen eine größere Variabilität als bei schlafenden Personen?

2) Zu Programmteil (B): Messen Sie in der Ableitung mit der deutlichsten positiven Hauptantwort P1 (welche ist das?) die Latenzen und Amplituden der Hauptantworten N1, P1 und N2.

Mit welchem Vorgang ist P1 korreliert?

Warum sind diese Signale in den verschiedenen Ableitungen nicht synchron?

Auswertungsbogen siehe nächste Seite

Auswertung

Augenbewegungsartefakte	**Abl. F**	**Abl. C**	**Abl. P**	**Abl. O**
Signalamplitude (µV):				
Synchronie in Ableitungen F – O	ja / nein (ankreuzen)			
α-Wellen	**Ableitung F**		**Ableitung O**	
Mittlere Frequenz (Hz)				
Signalamplitude (µV)				
Synchronie in Ableitungen F – O				
β-Wellen	**(Ableitung unbekannt)**			
Mittlere Frequenz (Hz)				
α-Blockade durch Lichtreiz	**Gewählte Ableitung:**			
Latenz vom Lichtreizbeginn bis zur α-Blockade in F und O (in Sekunden)				
Epileptische Potentiale	**Gewählte Ableitung:**			
Höchste Potentialamplitude (µV)				
Mittlere Frequenz der "spike and wave"-Komplexe (Hz)				
Mittlere Frequenz der Grundaktivität (Hz)				
Mittlere Amplitude der Grundaktivität µV)				
Schlafspindeln	**Gewählte Ableitung:**			
Mittlere Frequenz der Spindeln (Hz)				
Mittlere Amplitude der Spindeln (µV)				
Mittlere Frequenz der Grundaktivität (Hz)				
Evozierte Potentiale	**Gewählte Ableitung:**			
N_1: Latenz (s) / Amplitude (µV)				
P_1: Latenz (s) / Amplitude (µV)				
N_2: Latenz (s) / Amplitude (µV)				

II: Reflexe und Elektrophysiologie des peripheren Nerven

GK 14.1.4

Lehrbücher: Speckmann / Hescheler / Köhling, 5. Aufl., Kap. 2 und 4
Klinke / Pape / Silbernagl, 5. Aufl., Kap. 3, 4, 17, 23.1 und 23.2
Schmidt / Lang / Heckmann, 31. Aufl., Kap. 4 - 8

Fallbeispiel: Ein Hausarzt wird zu einem 50-jährigen Patienten gerufen, der im Bett liegt und über starke Schmerzen im Rücken klagt, die in das rechte Bein ausstrahlen. Bei der Untersuchung findet der Hausarzt eine verspannte paravertebrale Muskulatur, Schmerzen bei Beugung des Beins (Lasègue-Zeichen) und bei Husten sowie einen abgeschwächten Patellarreflex. Mit der Vermutungsdiagnose „Bandscheibenvorfall im Bereich der Lendenwirbelkörper 3 – 4" überweist er den Patienten in eine neurologische Klinik. Hier bestätigt sich die Vermutungsdiagnose aufgrund von Befunden bildgebender Verfahren. Um das Ausmaß der Nervenschädigung im Bereich des Foramen intervertebrale durch den Bandscheibenprolaps näher zu untersuchen, werden nach einer Elektromyographie die Nervenleitungsgeschwindigkeit und der Hoffmann-Reflex registriert. Ziel dieser Untersuchungen ist es, den Befund weiter zu erhärten sowie Hinweise auf den Schweregrad der Kompression wie auf die Prognose zu erhalten.

Aufgabe:

Vergleichende Messung der Reflexzeit eines Eigenreflexes anhand der Registrierung der Bewegung sowie des dazugehörigen Elektromyogramms.

Die folgenden Versuche werden an allen Praktikumsteilnehmern durchgeführt, und zwar mit jeweils 5 Einzelmessungen. Den eigentlichen Messungen sollen jeweils einige Probebestimmungen zum Eingewöhnen vorausgehen.

Stichworte:

Zelluläre Elektrophysiologie; Ruhe- und Aktionspotential; Reflexbogen, Eigenreflexe, Fremdreflexe, Patellarreflex, T- und H-Reflex, Reflexzeit, synaptische Übertragungszeit, Nervenleitungsgeschwindigkeit, Muskelspindel, EMG, Wahlzeit, Bahnung, zentrale sensomotorische Verarbeitung.

1. Reflexzeit des Patellarreflexes

a) Bestimmung durch Registrierung der Reflexbewegungen

Geräte:

PC-Oszillograph (Picoscope), Kontaktreflexhammer mit Bewegungsindikator

Durchführung:

Die Versuchsperson setzt sich dazu auf den Versuchstisch und lässt die Unterschenkel nahe der Kante frei herabhängen. Am Fußgelenk des zu untersuchenden Beines wird eine kleine Krokodilklemme mithilfe eines Gummibandes befestigt. Der Bewegungsindikator, ein Elektromagnet, hält bei Stromdurchgang ein Eisenplättchen, an dem eine Schnur angebracht ist, als Deckel mit regelbarer Kraft fest. Mit Hilfe der verstellbaren Trägerplatte wird der Bewegungsindikator auf gleiche Höhe mit dem Fußgelenk der Versuchsperson gebracht. Die Krokodilklemme wird jetzt so an der Schnur festgeklemmt, dass sie den Fuß straff ohne Durchhängen mit dem Indikator verbindet.

Der Indikator ist mit dem Eingang des Vertikalverstärkers, der Ausgang des Vertikalverstärkers mit Eingang A des PC-Oszillographen, der Kontaktreflexhammer mit der Buchse für die externe Triggerauslösung am PC-Oszillographen verbunden.

Die empfohlenen Einstellungen am PC-Oszillographen sind: Zeitbasis 20 ms/div; Empfindlichkeit: ±10 V; Triggermodus „Repeat“ oder „Single“; Triggerkanal „Ext“; Pre-Trigger: 10 %.

Ein weiterer Versuchsteilnehmer führt nun mit dem Reflexhammer einen Schlag auf die Patellarsehne und löst dadurch am PC-Oszillographen einen Strahldurchgang aus, dessen Start durch einen vertikalen Ausschlag (Peak) gekennzeichnet ist. Eine nachfolgende Reflexkontraktion bewirkt durch das Abreißen des Eisenplättchens eine Induktionsspannung und damit eine Vertikalablenkung des Strahls. Der zeitliche Abstand dieser Ablenkung vom Strahlbeginn (Peak) wird – von einem dritten Praktikanten – als Reflexzeit bestimmt.

Auswertung:

Die bei der Registrierung gemessenen Strecken werden für jede Versuchsperson in die obere Zeile der Tabelle 1a eingetragen und entsprechend in Millisekunden umgerechnet. Jede Versuchsperson errechnet dann den Mittelwert ($\bar{x}_E$) und die Standardabweichung (s_E) ihrer persönlichen Messwerte. Aus den eigenen Einzelwerten und denen der übrigen Versuchsteilnehmer wird dann der Mittelwert ($\bar{x}_G$) und die Standardabweichung (s_G) der Untergruppe berechnet. Die eigenen Werte werden daraufhin geprüft, ob sie im Bereich der doppelten Standardabweichung des Gruppenmittelwertes (also $\bar{x}_G \pm 2\ s_G$) liegen. Alle außerhalb dieses Bereichs liegenden Werte werden in der Tabelle rot umrandet.

Ergebnisnachweis:

Werte der Tabelle 1a auf Seite 1.14.

b) Bestimmung durch Registrierung des Elektromyogramms

Geräte:

PC-Oszillograph, Vorverstärker, Kontaktreflexhammer, Oberflächenelektroden

Vorbereitung:

Das Elektromyogramm wird vom Oberschenkel abgeleitet; daher für zweckmäßige Bekleidung sorgen (z. B. Shorts, Turn- oder Badehose mitbringen).

Versuchsverlauf:

Die Registrierung der elektrischen Aktivität des Oberschenkelmuskels (M. rectus femoris) erfolgt durch zwei Oberflächenelektroden, die über dem oberen Drittel in der Medianlinie des Oberschenkels angebracht werden. Die Ableitungspunkte werden dabei so gewählt, dass sie voneinander einen Abstand von 5 – 10 cm aufweisen. Die Elektroden werden mit Elektroden-Gel bestrichen und mit Gummibändern befestigt. Es ist darauf zu achten, dass zwischen Elektrodenfläche und Haut über das Gel guter Kontakt besteht. Anschließend werden die beiden Elektroden über Kabel mit den Eingängen des Vorverstärkers verbunden. Der Ausgang des Vorverstärkers wird mit Eingang B des PC-Oszillographen verbunden. Der Kontaktreflexhammer wird mit der Buchse für die externe Triggerauslösung am PC-Oszillographen verbunden. Für Kanal B die passende Empfindlichkeit einstellen.

Die Erdung erfolgt über eine am Fußgelenk angebrachte weitere Elektrode, die an die Erdungsbuchse des Vorverstärkers angeschlossen wird. Der Patellarreflex wird nun in derselben Weise wie in Teil a) ausge-

löst. Als Reflexzeit wird der zeitliche Abstand von Beginn der Ablenkung des Oszillographenstrahls bis zur ersten deutlichen Potentialänderung gemessen.

(Achtung: Vor den eigentlichen Messungen erst anhand von Proberegistrierungen den richtigen Verstärkungsfaktor des Y-Verstärkers einstellen!)

Auswertung:

Die Auswertung erfolgt wie unter a) beschrieben, jedoch werden die gemessenen Größen in Tabelle 1b (Seite 1.14) eingetragen. Außerdem ist die Differenz der Mittelwerte der unter a) und b) bestimmten Reflexzeiten zu bestimmen, und zwar sowohl für die Eigen- als auch für die Gruppenwerte.

Ergebnisnachweis:

Mess- und Rechenwerte der Tabelle 1b auf Seite 1.14.

1. Patellarreflex, Ergebnisnachweise

a) Reflexbewegung

Ablenkfaktor:

Eigene Werte x_E	Messwerte in Div					Mittelwert der eigenen Messwerte	
	Messwerte in ms						
						$\bar{x}_E =$	$s_E =$
Messwerte der übrigen Gruppenmitglieder in ms x_G						Mittelwert aller Messwerte	
						$\bar{x}_G =$	$s_G =$

b) Elektromyogramm

Ablenkfaktor:

Eigene Werte x_E	Messwerte in Div					Mittelwert der eigenen Messwerte	
	Messwerte in ms						
						$\bar{x}_E =$	$s_E =$
Messwerte der übrigen Gruppenmitglieder in ms x_G						Mittelwert aller Messwerte	
						$\bar{x}_G =$	$s_G =$

Messwertdifferenz zwischen Reflexbewegung und Myogramm

Eigene Werte: $\bar{x}_{E,B} - \bar{x}_{E,M} =$

Gruppenwerte: $\bar{x}_{G,B} - \bar{x}_{G,M} =$

2. H-Reflex

(entnommen aus der Praktikumsanleitung der Universität Münster, Institut für Physiologie, 1989)

Geräte:

Reizgerät, Reizelektroden, Vorverstärker, Oberflächenelektroden, PC-Oszillograph (Picoscope)

EMG-Ableitung vom M. gastrocnemius nach Reizung des N. tibialis

Zur Bestimmung von Nervenleitungsgeschwindigkeiten werden in der Neurologie die Reizung peripherer Nerven und die Aufzeichnung von Elektromyogrammen (oder Elektroneurogrammen) kombiniert. Um z. B. die Leitungsgeschwindigkeit motorischer Nervenfasern zu ermitteln, reizt man den Muskelnerven an zwei verschiedenen Stellen und misst jeweils die Latenz zwischen der Reizung und dem im Muskel ausgelösten Summenaktionspotential. Aus dem Abstand d (m) der Reizorte und der Differenz Δt (s) der Latenzzeiten kann die Leitungsgeschwindigkeit c (m/s) berechnet werden.

Die Kombination von Nervenreizung und Elektromyographie wird auch zur Bestimmung von Nervenleitungsgeschwindigkeiten in Reflexbögen eingesetzt. Dieses Verfahren wird im folgenden Praktikumsversuch am Beispiel der Stimulation des N. tibialis und der EMG-Ableitung vom M. gastrocnemius vorgestellt. Die neurophysiologischen Grundlagen dieses Verfahrens seien am Schema der Abb. 1.3 erläutert.

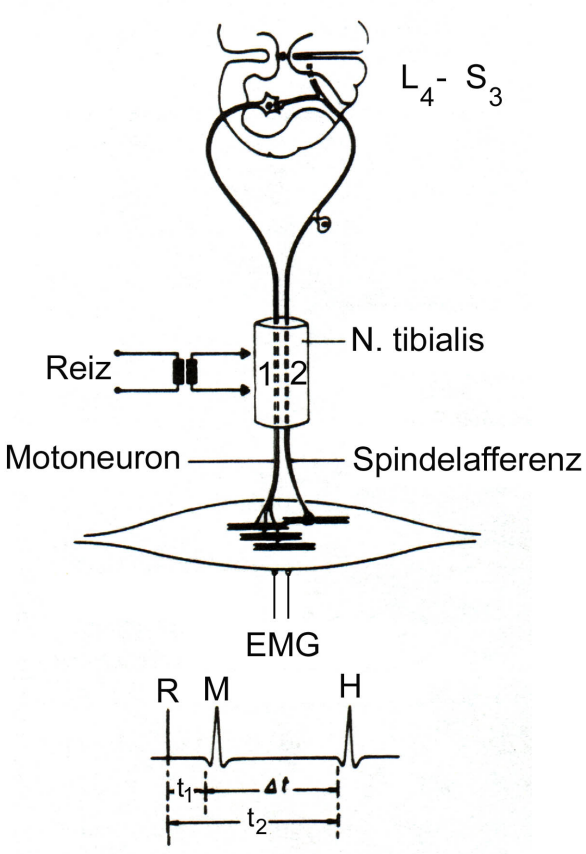


Abb. 1.3 Bestimmung der Leitungsgeschwindigkeit im monosynaptischen Reflexbogen
t_1, t_2 = Latenzzeiten
M = direkte Muskelantwort
H = indirekte Muskelantwort (H-Reflex)

Die nach Reizung des N. tibialis im EMG registrierten Summenaktionspotentiale werden hinsichtlich ihrer Amplitude und Latenz durch mehrere Faktoren beeinflusst:

a) Gereizt werden sowohl sensible als auch motorische Fasern des Nerven. Die Ia-Fasern von den Muskelspindeln haben eine niedrigere Reizschwelle als die α-Motoneurone; zur Aktivierung von Ib-Fasern (Golgi-Afferenzen von den Sehnenorganen) sind noch höhere Reizstärken erforderlich.
b) Die am Reizort ausgelösten Aktionspotentiale werden sowohl orthodrom[1] als auch antidrom geleitet. Antidrom geleitete Erregungen der α-Motoneurone können durch ihre Refraktärphase u. U. eine Erregungsübertragung im monosynaptischen Reflexbogen blockieren.
c) Die motorischen Vorderhornganglienzellen können bei stärkerer Reizung des N. tibialis auch autogen (über Golgi-Afferenzen) und rekurrent (über Renshaw-Zellen) gehemmt werden (in Abb. 1.3 nicht dargestellt).

Wegen dieser Zusammenhänge erhält man bei vorsichtiger Erhöhung der Reizstärke zunächst eine über den Reflexbogen ausgelöste Muskelerregung, den sog. H-Reflex (benannt nach dem Physiologen Paul Hoffmann (1884-1962, Freiburg)). Die Reflexerregung startet dabei in den Ia-Fasern (Stelle 2 in Abb. 1.3), wird orthodrom zum Rückenmark geleitet, dort monosynaptisch auf α-Motoneurone übertragen und gelangt in diesen (orthodrom) zum Muskel. Typische Latenzzeit: 30 - 35 ms (t_2 in Abb. 1.3).

Erhöht man die Reizstärke, dann werden durch den Reiz neben Ia-Fasern auch α-Motoneurone überschwellig gereizt. Diese Erregungen gelangen vom Reizort (Stelle 1 in Abb. 1.3) orthodrom zum Muskel und antidrom zum Rückenmark. Im Muskel wird dabei die direkte oder M-Antwort ausgelöst, deren Latenzzeit (t_1 in Abb. 1.3) natürlich kleiner ist als die Latenz des H-Reflexes (typische Werte 5 - 10 ms). Die vom Reizort ausgehenden antidrom geleiteten Erregungen des Motoneurons rufen die oben unter b) und c) beschriebenen Hemmungsphänomene hervor.

Weitere Erhöhung der Reizstärke aktiviert zunehmend auch Golgi-Afferenzen (in Abb. 1.3 bei 2), so dass die zentralen Hemmungseffekte intensiviert werden und der H-Reflex schließlich ausfällt.

Versuchsanordnung (Abb. 1.4)

Das EMG wird mit zwei Oberflächenelektroden vom M. gastrocnemius abgeleitet. Über eine weitere Oberflächenelektrode wird die Versuchsperson am Vorverstärker geerdet. Die Elektroden werden mit dem Vorverstärkereingang, der Ausgang des Vorverstärkers mit dem Eingang A des PC-Oszillographen verbunden: Triggerung (Auslösung) der Signalaufzeichnung am PC-Oszillographen durch den Reizimpuls am Ext.-Trigger-Eingang.

Zur Stimulation des N. tibialis wird ein Reizelektrodenpaar mit der Hand auf die Kniekehlenhaut über dem N. tibialis gedrückt (Abb. 1.4).

Die Reizelektroden sind über einen Trenntransformator mit dem Reizgerät verbunden. Gereizt wird mit (annähernd) rechteckigen Impulsen: Impulsfrequenz 1/s; Impulsdauer ca. 1 ms. Die Reizintensität wird von 0 aus langsam so weit erhöht, dass eine deutliche Reizantwort auf dem Oszillographen beobachtet werden kann. Befinden sich die Reizelektroden dicht über dem Nerven und besteht guter Kontakt zwischen Reizelektroden und Haut, so genügen zur Auslösung der Reizantwort so geringe Reizintensitäten, dass die Reizung nicht schmerzhaft ist.

[1] dromos (griechisch) = Lauf: "Orthodrom" wird die "normale" Leitungsrichtung genannt, in sensiblen Nervenfasern also die afferente, in motorischen Nervenfasern die efferente Erregungsleitung. Eine Erregungsleitung in der entgegengesetzten Richtung (motorisch: afferent; sensibel: efferent) bezeichnet man als "antidrom".

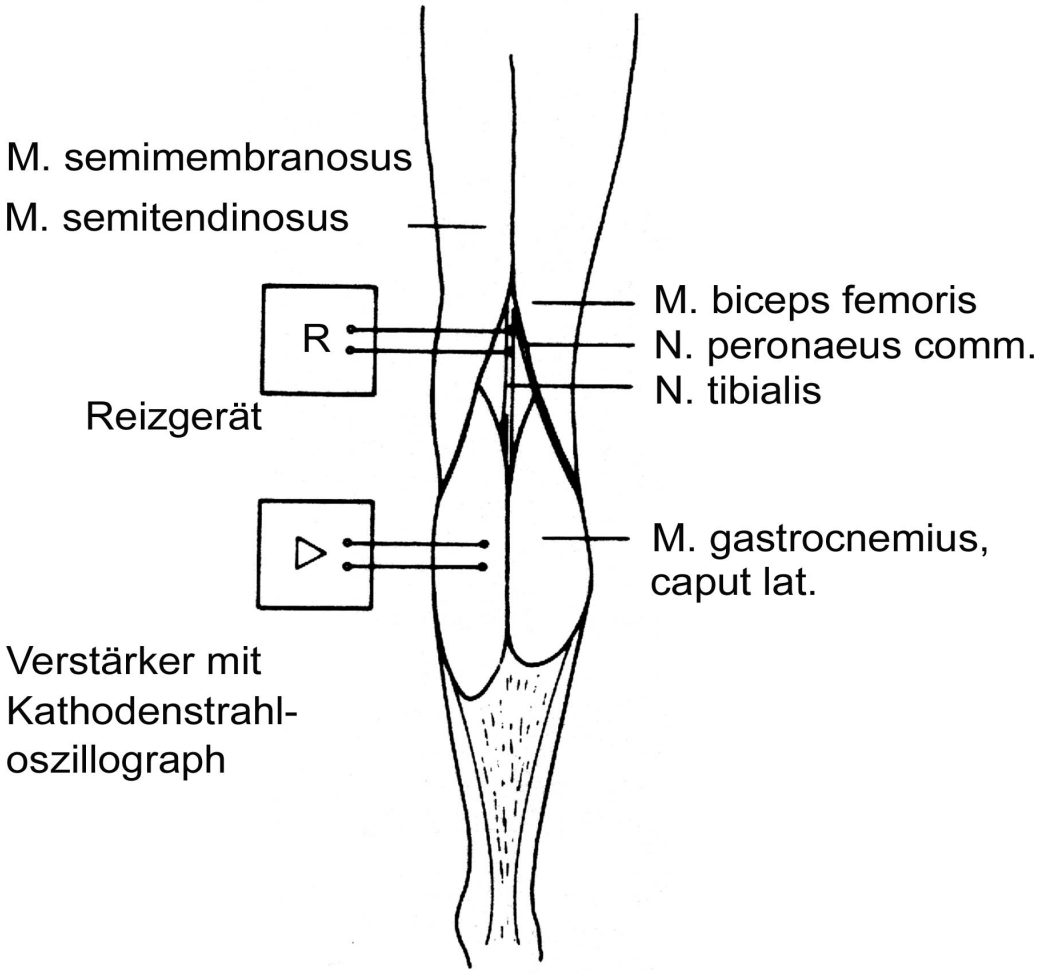


Abb. 1.4 Versuchsanordnung zu Aufgabe 2

Ergebnisnachweis:

Mess- und Rechenwerte gemäß Seite 1.18.

2. H-Reflex, Ergebnisnachweise

Ablenkfaktor:

Messwerte in Div					Mittelwert der eigenen Messwerte	
Messwerte in ms						
					$\bar{t}_1$ =	s =

Ablenkfaktor:

Messwerte in Div					Mittelwert der eigenen Messwerte	
Messwerte in ms						
					$\bar{t}_2$ =	s =

Skizze des Oszillographenbildes	$\bar{t}_1$ = ms $\bar{t}_2$ = ms
Leitungszeit Von der Erregung durchlaufene Strecke = 2 x Distanz Kniekehle bis 11./12. Brustwirbel Leitungsgeschwindigkeit	Δt = ms s = m $v = \frac{s}{\Delta t} = \frac{\quad m \quad}{ms} =$ $\frac{m}{s}$

Aufgaben zur Computersimulation „Membranströme“

1. **Grundeinstellungen ändern: Anzahl der Pulse auf 50 erhöhen**.

   Mit "Applizieren" den eingestellten Spannungssprung auslösen.
   Messen Sie den Kalium- und den Natrium-Gesamtstrom.

2. **Ändern der Ionenkonzentrationen**.

   a. Erhöhen Sie die Außenkonzentration von Kalium auf 160 mM.
   Messen Sie wie unter (1) die Ströme. Wie erklären Sie die Unterschiede?

   b. Setzen Sie die Kaliumkonzentration auf den ursprünglichen Wert zurück. Erhöhen Sie dann die intrazelluläre Natriumkonzentration auf 160 mM.
   Messen Sie die Ströme. Welche Erklärung haben Sie für die Unterschiede?

3. **Setzen Sie die Natriumkonzentration auf den ursprünglichen Wert zurück**.

   Erhöhen/Erniedrigen Sie die Temperatur um 5° C.
   Wie verändern sich die Ströme?

4. **Was sehen Sie, wenn Sie TTX oder TEA verabreichen? Warum?**

5. **Reduzieren Sie nacheinander die Leitfähigkeit des K- und des Na-Kanals auf 1/10 des ursprünglichen Wertes**.

   Welche Änderungen der Ströme sehen Sie?
   Wie erklären Sie diese Änderungen?

6. **Erstellen Sie eine Strom-/Spannungskennlinie jeweils getrennt für den K- und den Na-Kanalstrom**.

   Setzen Sie die Anzahl der Pulse auf 20. Erhöhen Sie dazu das "Kommando-Potenzial" beginnend von -70 mV in 10 mV-Schritten bis auf +100 mV und messen Sie jeweils den maximalen Natrium- und Kalium-Strom.
   Tragen Sie die Daten auf Millimeterpapier in ein Koordinatenkreuz ein: x-Achse = Kommando-Potenziale; Y-Achse = Membranströme Kalium oder Natrium (Einwärtsströme negativ und Auswärtsströme positiv)
   Beschreiben und erklären Sie Ihre Beobachtungen!
   Was passiert, wenn Sie das Haltepotenzial auf -40mV erhöhen?

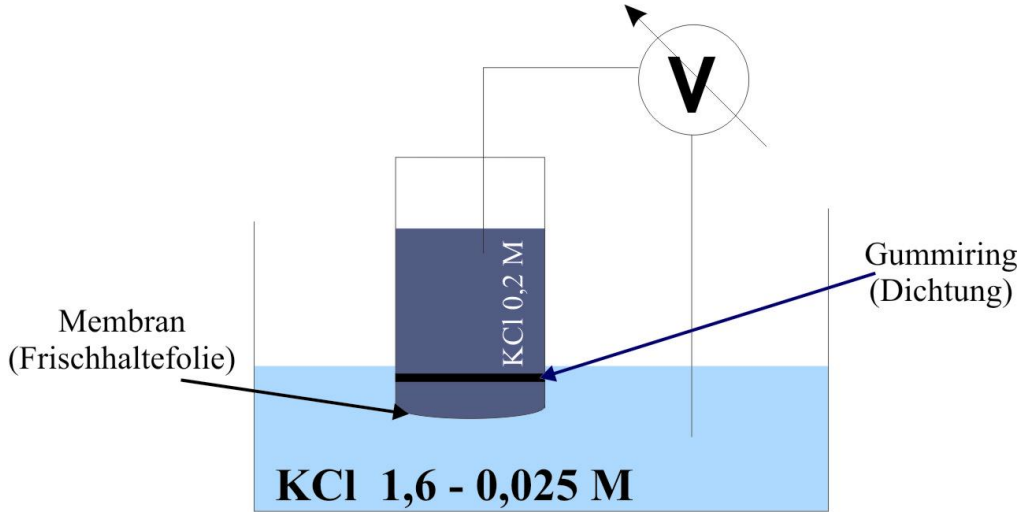
Versuch zur Nernst-Gleichung

Benötigte Chemikalie:

- KCl 1,6 M (119,2 g auf 1 l)
- KCl 0,2 M (14,9 g auf 1 l)

Benötigte Geräte:

- Pneumatische Wanne
- aufgesägtes 50 ml Falcon-Röhrchen
- Frischhaltefolie
- Gummiring
- 50 ml Spritze
- Abfallgefäß
- Voltmeter mit Elektroden



Die Frischhaltefolie wird über das 50 ml Falcon-Röhrchen gespannt und mit dem Gummiring abgedichtet.

In die Pneumatische Wanne werden 100 ml der 1,6 M KCl-Lösung gegeben. Das Falcon-Röhrchen wird mit der 0,2 M KCl-Lösung gefüllt.

Das Falcon-Röhrchen wird nun in die 1,6 M KCl-Lösung getaucht. Eine Elektrode wird in das Falcon-Röhrchen gegeben und eine in die Pneumatische Wanne.

Da die Frischhaltefolie für Kaliumionen permeabel ist, sollte sich ein Potenzial zwischen der KCl-Lösung in der Wanne und der KCl-Lösung in dem Falcon-Röhrchen aufbauen.

Nun wird die KCl-Konzentration in der Wanne von 1,6 auf 0,8; 0,4; 0,2; 0,1; 0,05 und 0,025 M geändert, indem man mit der Spritze 50 ml aus der Wanne entfernt und sie durch 50 ml H_2O ersetzt.

	1,6/0,2 M	0,8/0,2 M	0,4/0,2 M	0,2/0,2 M	0,1/0,2 M	0,05/0,2 M	0,025/0,2 M
Gemessen [mV]							
Berechnet [mV]							

Die theoretischen Werte werden mit der Nernst-Gleichung berechnet.

$$E_x = -58{,}5 \cdot \log C_i / C_a$$

C_a = KCl-Konzentration außen
C_i = KCl-Konzentration innen

TEILVERSUCH I: SPRACHE, GEHÖR

GK 17.2-3

Lehrbücher: Speckmann / Hescheler / Köhling, 5. Aufl., Kap. 3.4
Klinke / Pape / Kurtz / Silbernagl, 6. Aufl., Kap. 21
Schmidt / Lang, 30. Aufl., Kap. 16
Guter Weblink: „ars auditus" der Universität Wuppertal
(http://www.dasp.uni-wuppertal.de/ars_auditus/audiatur.htm)

Thematische Stichwörter zum gesamten Versuch

Bestimmungsgrößen des Schalls: Frequenz, Wellenlänge, Ausbreitungsgeschwindigkeit; Schalldruck, Schallintensität (-stärke); Schalldruck- und Schallintensitätspegel. Dezibelskala; Schallwellenwiderstand. Schalltypen: Ton, Klang, Geräusch, Rauschen. Klangstruktur: Grundton, Oberton, Intervalle. Hörfeld: Umfang nach Schallfrequenz und -intensität; Hauptsprachbereich.

Phonation, Artikulation

Anatomische Grundlagen (s. Lehrbücher der Anatomie)

Thematische Stichwörter

Bau des Kehlkopfes und Nasen-Rachen-Raums; Kehlkopfmuskulatur und deren Innervation; Mechanik der Konfiguration der Stimmritze des Kehlkopfs, seiner Nebenräume und des Ansatzrohrs.

Fallbeispiel: Ein 8-jähriger Junge aus einer ländlichen Gegend wird in die Hals-Nasen-Ohren-Klinik überwiesen, weil seine recht monoton und näselnd klingende Sprache nur von Familienangehörigen „verstanden" wird. In der Schule werde er wegen dieses Defekts ausgelacht, berichtet die Mutter des Patienten und ergänzt, dass ihr Sohn schlecht höre. Die Untersuchung ergibt eine Gaumenspalte (Palatoschisis), die Verformungen des Ansatzrohrs, die für Sprachbildung notwendig sind, unmöglich macht (siehe offene und gedackte Pfeifen im Praktikum). Aus einem Funktionsverlust des M. tensor veli palatini haben sich Belüftungsstörungen des Mittelohrs und chronische Paukenhöhlenergüsse ergeben, die die Schwerhörigkeit erklären. Nach dem Verschluss der Palatoschisis ändert sich sein Stimmbild sofort. Der näselnde Charakter seiner Stimme ist verschwunden. Nach Behandlung seiner Paukenhöhlenergüsse bessert sich sein Hörvermögen beträchtlich und unter anschließender logopädischer Behandlung lernt der junge Patient innerhalb von 2 Jahren, normal zu sprechen.

Aufgaben des Teilversuchs Sprache, Gehör

1. Frequenzbereich der Sprachverständlichkeit

Versuchsziel

In diesem Versuch soll der für die Sprachverständlichkeit entscheidende Frequenzbereich bestimmt werden.

Thematische Stichwörter

Frequenzbereich der Vokale und Konsonanten, Hochpass-, Tiefpassfilter, Sprachaudiometrie

Versuchsanordnung, Geräte, Versuchsmaterialien

Die Versuchsanordnung besteht aus einem CD-Player, einem Verstärker, zwei Lautsprechern sowie einer CD mit den Testwörtern. Diese wurde im MZ der Universität Essen von den Herren Thomas Strauch und Ralf Wassermann hergestellt. Bei diesen Testwörtern handelt es sich um einsilbige Wörter, die bei der Aufnahme durch Tiefpass- oder Hochpassfilter gefiltert wurden. Dabei wurden – je nach der Grenzfrequenz des betreffenden Filters – in verschiedenem Ausmaß nur die tiefen bzw. hohen Frequenzanteile durchgelassen. Die Steilheit der verwendeten Filter betrug dabei 96 dB/Oktave. Die Wörter sind dem Freiburger Sprachverständlichkeitstest mit einsilbigen Wörtern nach DIN 45621 entnommen. Sie sind in 20 Blöcken von jeweils 10 Wörtern zusammengefasst. Vor jedem Block wird in ungefilterter Sprache die Blocknummer angegeben. Die Versuchspersonen sollen die von ihnen verstandenen Wörter notieren.

Versuchsablauf

Der Versuch ist von allen Praktikanten der Gruppe gemeinsam durchzuführen. Trotzdem bitte absolute Ruhe im Versuchsraum.

Verschiedene Wörter sind wegen der starken Filterung sehr leise. Der Regler für die Verstärkung ist so eingestellt, dass diese Wörter gerade eben gehört werden können (bitte konzentrieren), die wenig gefilterten Wörter aber noch nicht dröhnen. Sowohl der Lautstärkeregler des CD-Players als auch der Verstärkungsregler am Verstärker bleiben während des Versuchs unverändert. Nach dem Start des CD-Players durch den Betreuer konzentrieren sich die Versuchspersonen jetzt darauf, die vorgespielten Wörter zu verstehen, und tragen sie in das Protokoll unter der jeweiligen Blocknummer ein. Für ein nicht verstandenes Wort wird ein " – " notiert. Der zeitliche Abstand der gesprochenen Testwörter lässt diese Notierungen ohne Schwierigkeiten zu. – Bitte führen Sie während und nach dem Versuch keine Diskussionen über das, was hätte "allgemein" verstanden werden sollen. Bitte arbeiten Sie auch bei der Auswertung jeder für sich.

Auswertung

Der Betreuer des Versuchs händigt eine Liste der auf das Tonband gesprochenen Wörter aus. Hinter jedem Wort sind die Filterart (H für Hochpass, T für Tiefpass) und die Grenzfrequenz (300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100, 2400, 2700, 3000 Hz) angegeben. Anhand dieser Liste wird für jede Filtereinstellung der Prozentsatz der richtig verstandenen Wörter bestimmt, und zwar sowohl die Werte des einzelnen Praktikanten als auch die Mittelwerte der ganzen Gruppe.

Ergebnisnachweis

- Dokumentation der vom betreffenden Praktikanten verstandenen Wörter (in die Blöcke des Tests gegliedert) und prozentuale Angabe für alle verwendeten Filter
- Diagramm mit den relativen Anteilen der **von allen Gruppenmitgliedern** bei Hoch- bzw. Tiefpassfilterung verschiedener Grenzfrequenzen verstandenen Wörter
- Angabe der Frequenzgrenzen der Sprachverständlichkeit

Block 1	
H 09	
H 21	
T 21	
H 06	
T 12	
T 27	
T 18	
H 12	
H 06	
T 30	

Block 2	
H 03	
T 09	
T 06	
T 24	
H 30	
T 09	
H 18	
H 15	
T 30	
H 24	

Block 3	
H 24	
T 03	
H 12	
T 15	
T 18	
T 03	
H 27	
H 03	
T 09	
T 30	

Block 4	
H 15	
H 09	
T 24	
H 18	
T 06	
H 21	
T 21	
T 15	
H 12	
H 30	

Block 5	
T 27	
T 15	
T 12	
H 12	
T 24	
H 30	
H 27	
T 06	
H 06	
H 12	

Block 6	
T 27	
H 21	
H 24	
T 18	
H 15	
H 15	
T 21	
H 27	
T 24	
T 03	

Block 7	
T 30	
H 03	
T 09	
H 09	
H 21	
T 12	
H 03	
T 18	
T 24	
H 27	

Block 8	
H 09	
H 18	
H 24	
H 12	
T 21	
T 03	
H 06	
T 27	
T 12	
T 30	

Block 9	
T 06	
H 06	
T 24	
T 12	
H 21	
T 18	
H 03	
T 06	
H 06	
T 15	

Block 10	
T 24	
T 03	
H 30	
H 27	
T 21	
H 03	
H 18	
T 27	
T 27	
H 30	

Block 11	
H 09	
T 18	
H 06	
T 09	
T 21	
T03	
H 18	
H 21	
T 12	
H 15	

Block 12	
T 09	
T 15	
T 09	
H 09	
H 21	
T 30	
H 24	
H 12	
T 18	
T 03	

Block 13	
H 27	
T 21	
T 15	
H 27	
H 18	
T 21	
H 09	
H 15	
T 15	
H 06	

Block 14	
T 27	
T 06	
T 30	
H 15	
H 24	
T 03	
H 21	
T 30	
H 09	
T 30	

Block 15	
T 27	
H 24	
H 03	
T 27	
H 12	
T 06	
T 21	
H 30	
T 21	
H 09	

Block 16	
T 12	
T 15	
H 15	
H 30	
T 18	
H 03	
H 18	
T 09	
T 15	
H 18	

Block 17		Block 18		Block 19		Block 20	
T 24		H 30		T 18		T 24	
H 30		H 03		T 06		H 27	
T 06		T 06		T 03		H 12	
T 30		H 09		H 03		T 09	
H 18		T 24		H 21		H 15	
T 09		T 03		H 30		T 27	
H 15		H 12		T 12		T 15	
H 24		T 12		H 24		H 27	
T 12		H 27		H 06		H 06	
H 24		H 21		T 18		H 18	

Kontrollieren Sie nach Versuchsende mit Hilfe des Ihnen ausgehändigten Vordrucks für jedes Wort die Richtigkeit und tragen Sie es dem Filterwert zugeordnet als "richtig" oder "falsch" (schließt "nicht verstanden" ein) in die folgenden Tabellen ein.

Berechnen Sie dann für jeden Filterwert die relative Häufigkeit (in %) der von Ihnen verstandenen Wörter. Notieren Sie bitte auch die Werte der anderen Gruppenmitglieder und berechnen Sie das arithmetische Mittel. Die Auswertung kann im Laufe des Tages erfolgen, so dass zum Abtestat die ausgewerteten Diagramme vorliegen.

Für jeden Filter werden 10 Wörter gesprochen; diese entsprechen dann 100 %. Ein falsch verstandenes Wort entspricht dann einem Fehler von 10 %.

Hochpassfilterung:

Filter (Hz)	Anzahl eigener Wörter		relative Häufigkeit verstandener Wörter (in %)												
	richtig	falsch	eigene	andere Gruppenmitglieder											Mittelwert
H 300															
H 600															
H 900															
H 1200															
H 1500															
H 1800															
H 2100															
H 2400															
H 2700															
H 3000															

Tiefpassfilterung:

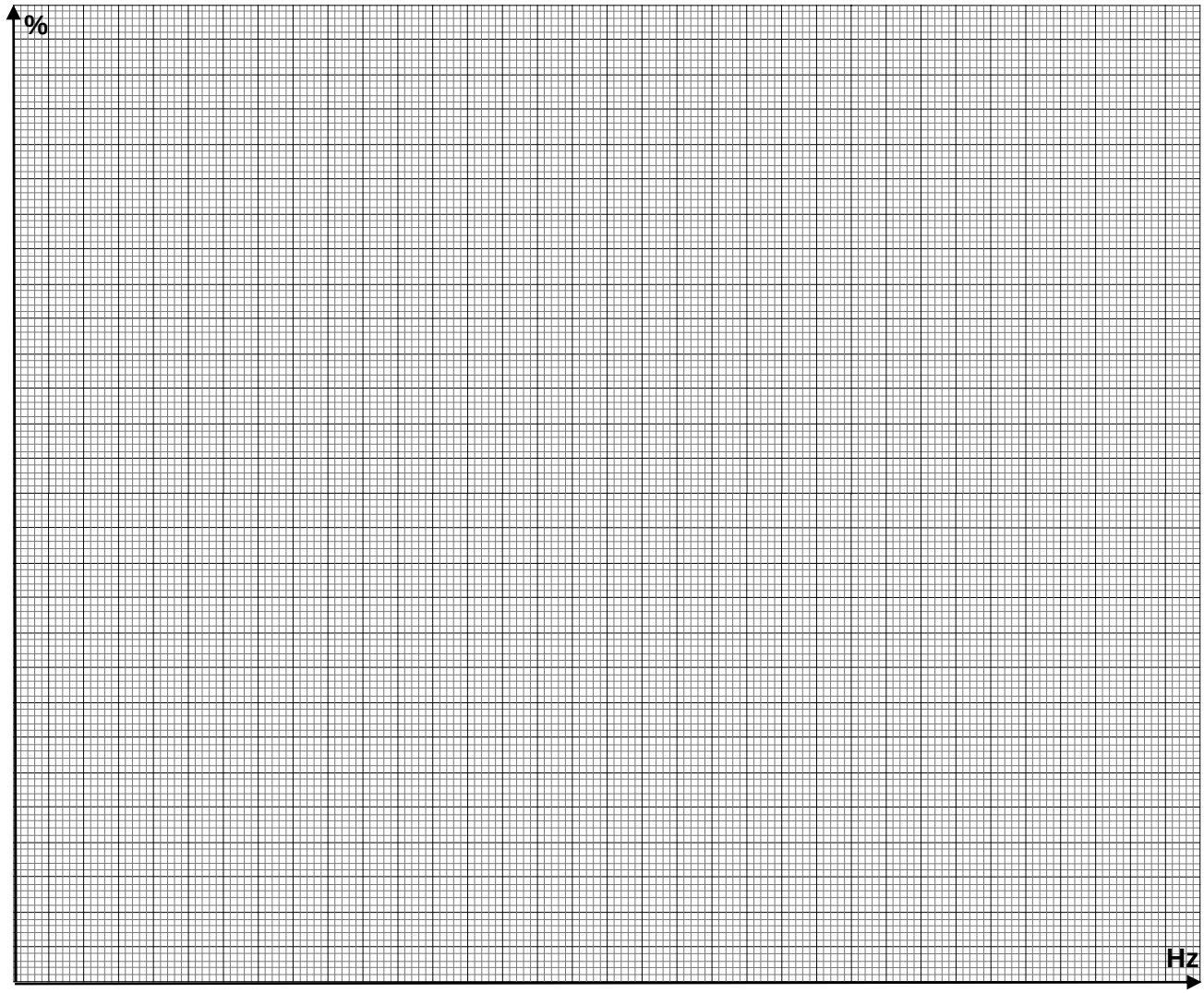
Filter (Hz)	Anzahl eigener Wörter		relative Häufigkeit verstandener Wörter (in %)												
	richtig	falsch	eigene	andere Gruppenmitglieder											Mittel-wert
T 300															
T 600															
T 900															
T 1200															
T 1500															
T 1800															
T 2100															
T 2400															
T 2700															
T 3000															

Diagramm

Hochpassfilterung: Werte mit durchgezogener Linie verbinden

Tiefpassfilterung: gestrichelte Linie

Tragen Sie Ihre eigenen Werte für Hoch- und Tiefpassfilter mit Bleistift ein. Zeichnen Sie in entsprechender Weise mit Farbstift die Mittelwerte Ihrer Praktikumsgruppe ein.



Zwischen welchen Grenzfrequenzen fand sich ein 50-%iges Sprachverständnis? Ermitteln Sie die 50-%-Werte bei den Mittelwertkurven für Hoch- und Tiefpassfilterung und markieren Sie sie im obigen Diagramm.

obere Grenze: f_o = _____ Hz untere Grenze: f_u = _____ Hz

2. Schallanalyse

Versuchsziel

In diesem Versuch werden verschiedene Typen von Schall (Töne, Klänge, Geräusche) in Oszillogrammen und Frequenzspektren dargestellt und ihre Frequenz- und Amplitudeneigenschaften analysiert.

Thematische Stichwörter

Frequenzanalyse: Bestimmungsgrößen des Frequenzspektrums; Verfahren der Frequenzanalyse: Fourier-Analyse, Frequenzspektrographie.

Sprachlaute: Grundmechanismus der Phonation; Grundfrequenz, Frequenzumfang und Sprechtonlage der männlichen und weiblichen Stimme. Grundmechanismus der Artikulation: Entstehungsweise und Zahl der Formanten. Entstehungsweise der Konsonanten. Eigenschaften der Vokale: Einteilung, Hauptformanten und Frequenzspektren. Eigenschaften der Konsonanten: Einteilung und Frequenzspektren. Modifikation der Frequenzcharakteristik beim Sprechen (Normal-/Flüstersprache) und Singen.

Versuchsanordnung, Geräte, Versuchsmaterialien

Die Versuchsanordnung besteht aus verschiedenen Schallquellen, einem Mikrophon mit Verstärker zur Umwandlung der Schalldruckwellen in elektrische Spannungen, einem Oszillographen zur Darstellung des Schalldruckverlaufs als Oszillogramm sowie einem Computer zur Aufnahme, zum Ausdruck sowie zur Analyse der Signale.

Als Schallquellen dienen die Stimmen der Versuchsteilnehmer und Stimmgabeln.

Der Verstärkungsfaktor des Mikrophons kann am Mikrophonverstärker mit dem "Mic"-Knopf stufenlos eingestellt werden (der "Phono"-Knopf, der einen potentiellen zweiten Eingang reguliert, wird im Versuch nicht benötigt und ist daher auf dem linken Anschlag = Verstärkung 0 zu belassen).

Der PC-Monitor und der Oszillograph arbeiten parallel. Um auf dem Oszillographen die Schwingungsbilder des Schalldrucks darstellen zu können, müssen diese Bilder gespeichert werden; der Oszillograph muss also dazu auf Speicherung gestellt werden. Beim PC-Monitor wird dies durch Betätigung der linken Maustaste bewirkt. Nach der Speicherung werden die Signale auf ihre Brauchbarkeit hin begutachtet und eventuell verworfen oder ausgedruckt. Der Rechner wird zur direkten Frequenzanalyse der aufgenommenen Signale verwendet.

Versuchsablauf

a) Stimmgabeltöne

Es soll von einer Stimmgabel exemplarisch das Schwingungsbild aufgenommen und die Frequenz dieser Stimmgabel berechnet werden. Die Stimmgabel wird parallel zum Resonanzkasten auf diesen gesteckt und durch Anschlagen zum Tönen gebracht. Der Ton wird mit dem Mikrophon aufgenommen und das Schwingungsbild auf dem Oszillographen und dem PC-Monitor gespeichert. (Bitte sofort Stimmgabelnummer und Ablenkgeschwindigkeit notieren). Periodendauer und Frequenz werden am Oszillographenschirm bestimmt.

Anschließend wird das Schwingungsbild ausgedruckt und im Folgenden mit dem Fourier-Analyse-Programm das Frequenzspektrum dieser Stimmgabel erstellt. Die Grundfrequenz wird bestimmt und in die Ergebnistabelle eingetragen. Dieses Spektrogramm wird zur Dokumentation ausgedruckt.

b) Vokale

Die Vokale A, E, I, O, U werden jeweils in gleichbleibender Tonhöhe und Lautstärke zunächst in das Mikrophon gesprochen, dann in deutlich erhöhter Tonlage gesungen; die Schwingungsbilder werden auf dem Oszillographen dargestellt. Die Vokale müssen bei der Registrierung genügend lange erklingen, um den stetigen

Teil des Klanges erfassen zu können (den Anlaut vermeiden!). Die Vokale sind dabei so zu verteilen, dass jedes Mitglied der Halbgruppe einen anderen Vokal bearbeitet. Vergleichen Sie, wenn möglich, männliche und weibliche Stimmen. Auf dem Oszillographenschirm ist jeweils die Grundfrequenz auszumessen; von einem Vokal werden die Schwingungsbilder der normalen und erhöhten Tonlage ausgedruckt.

Auch von den Vokalen werden die Frequenzspektren, und zwar bei normaler und erhöhter Tonlage, erstellt und Grundfrequenz und Formanten (s. Tab. 2.1) bestimmt. Vom gleichen Vokal, dessen Schwingungsbilder ausgedruckt wurden, werden auch die Spektrogramme bei normaler wie erhöhter Tonlage ausgedruckt. In welchem Frequenzbereich befinden sich die Formanten für einen bestimmten Vokal bei der männlichen und weiblichen Stimme bzw. beim Sprechen und Singen? Vergleichen Sie die Formanten von verschiedenen Vokalen.

c) Konsonanten

Entsprechend der vorigen Aufgabe werden einige Konsonanten (z. B. F, S, R, L, M oder N) - jedoch nur in normaler Tonlage gesprochen - bearbeitet; zwei dieser Schwingungsbilder sowie ein Spektrogramm, das zu einem dieser Bilder gehört, werden wieder ausgedruckt.

FORMANTEN DER VOKALE (nach: F. Trendelenburg)	
Vokal	Frequenzbereiche der Formanten (Hz)
a	800 - 1200
e	400 - 600; 2200 - 2600
i	200 - 400; 3000 - 3500
o	400 - 600
u	200 - 400

Tab. 2.1

Ergebnisnachweis

Registrierungen: Jeder Teilnehmer weist jeweils den Ausdruck eines Schwingungsbildes zusammen mit dem des zugehörigen Spektrogramms nach.

Messungen: Periodendauer und zugehörige (Grund-)Frequenz für je eine Schallprobe a) – c), ggfs. Grundfrequenz, Obertöne bzw. Formanten im Frequenzspektrum je einer Schallprobe a) – c).

a) **Ton,** erzeugt durch

Stimmgabel Nr.: _____

Horizontalablenkung:

1 Div = …… ms

Periode:

T = …… Div

= …… ms

Frequenz:

$f = \frac{1}{T} = ...Hz$

Schwingungsbild des Tons einer Stimmgabel
(Bitte die Zeitachse bezeichnen)

Hier bitte einkleben

Fourierspektrum des Tons:

Hier bitte einkleben

b1) **Vokal:** _____

gesprochen

Horizontalablenkung:

1 Div = ... ms

Periode:

T = ... Div

= ..... ms

Grundfrequenz:

$f = \frac{1}{T} = ...\ Hz$

Schwingungsbilder des Vokals in gesprochener Tonhöhe (c1) und in gesungener Tonhöhe (c2)
(Bitte die Zeitachse bezeichnen)

Hier bitte einkleben

b2) **Vokal:** _____

gesungen

Horizontalablenkung:

1 Div = ... ms

Periode

T = ... Div

= ..... ms

Grundfrequenz:

$f = \frac{1}{T} = ...\ Hz$

Fourierspektrum des Vokals _____ in gesprochener Tonhöhe (b1)

Hier bitte einkleben

Fourierspektrum des Vokals _____ in gesungener Tonhöhe (b2)

Hier bitte einkleben

c) **Konsonant** _____

Horizontalablenkung:

1 Div = ... ms

Periode (wenn vorhanden):

T = ... Div

= ..... ms

Frequenz:

$f = \frac{1}{T} =$ ..... Hz

Schwingungsbilder der Konsonanten _____ und _____
(Bitte bezeichnen)

Hier bitte einkleben

Fourierspektrum des Konsonanten _____

Hier bitte einkleben

Ergebnistabelle

Schallquelle	Grundfrequenz	Obertöne	Formanten
Stimmgabel			
Vokal			
Konsonant			

3. Tonschwellen-Audiometrie

Fallbeispiel: Ein 44-jähriger Bergmann kommt in die Praxis eines Hals-Nasen-Ohrenarztes, weil er in der letzten Zeit zunehmend schlechter hört. Der Arzt befragt ihn nach seinem Berufsalltag. „Laut ist es schon an meinem Arbeitsplatz", erzählt er. „Vor allem die Kompressoren sind so laut, dass ich manchmal mein eigenes Wort nicht mehr verstehe. Wir sollen dann ja Schutzkappen auf die Ohren setzten. Aber darunter schwitze ich so. Also ‚vergesse' ich das Tragen der Kappen." Bei der Untersuchung des Patienten zeigt sich, dass er geflüsterte Zahlen wie 47, 74, 77 (mit einem großen Anteil an hochfrequenten Komponenten) nicht versteht, wohl 28, 36 (die kaum hochfrequente Anteile besitzen). Nach dem Flüstertest zeichnet der Arzt ein Tonaudiogramm auf und findet einen Hörverlust von 40 dB im Bereich von 4000 Hz (c^5-Senke). Ein SISI-Test schließt sich an, in dem der Patient während eines Tones von 20 dB 250 ms dauernde Intensitätszunahmen von 1 dB regelmäßig erkennt. Aus der Anamnese und den Befunden diagnostiziert der Arzt eine Lärmschwerhörigkeit, die bei Menschen fast regelmäßig auftritt, wenn sie längere Zeit Schalldruckpegeln von über 85 dB ausgesetzt sind. Solche Belastungen, aber auch toxische Wirkungen von einigen Medikamenten (Antibiotika, Zytostatika etc.) führen zu Schädigungen der Haarzellen im Innenohr und zu der charakteristischen c^5-Senke, die den Patienten zum Arzt geführt hat.

Versuchsziel

Es sollen die Hörschwellen für Töne verschiedener Frequenz bestimmt und mit den Normalwerten verglichen werden.

Thematische Stichwörter

Hörfeld, Schallleitung und Hörschwelle bei Luft- und Knochenleitung. Arbeitsweise des Audiometers: Messverfahren. Abtragung der Ergebnisse im klinischen Audiogramm: Relative Schwelle (HL), Hörverlust (dB HV); Alterskorrektur der normalen Hörschwelle. Einteilung der Hörstörungen und ihre typischen Manifestationen im Audiogramm: Schallleitungsstörungen, Schallempfindungsstörungen, kombinierte Störungen.

Versuchsanordnung, Geräte

Zum Versuch wird ein Audiometer Typ KS5 der Fa. MAICO-Diagnostic GmbH, Berlin) mit Zubehör (Kopfhörer, Audiogrammkarten) verwendet (siehe Abb. 2.1). Dieses Gerät ist für klinische Zwecke, HNO-Praxen und pädaudiologische Beratungsstellen bestimmt. Es vereinigt alle Funktionen in sich, die zur Erfüllung der obigen Aufgabe erforderlich sind. Klinischen Gepflogenheiten entsprechend wird dabei bei allen Frequenzen – unabhängig von der jeweiligen unterschiedlichen absoluten Schallintensität (Dezibel SPL) – der zu erwartende Normalwert der Absolutschwelle gleich "0" gesetzt, und lediglich der Hörverlust in Dezibel (HV) gegen die linearisierte Schwellenkurve abgetragen.

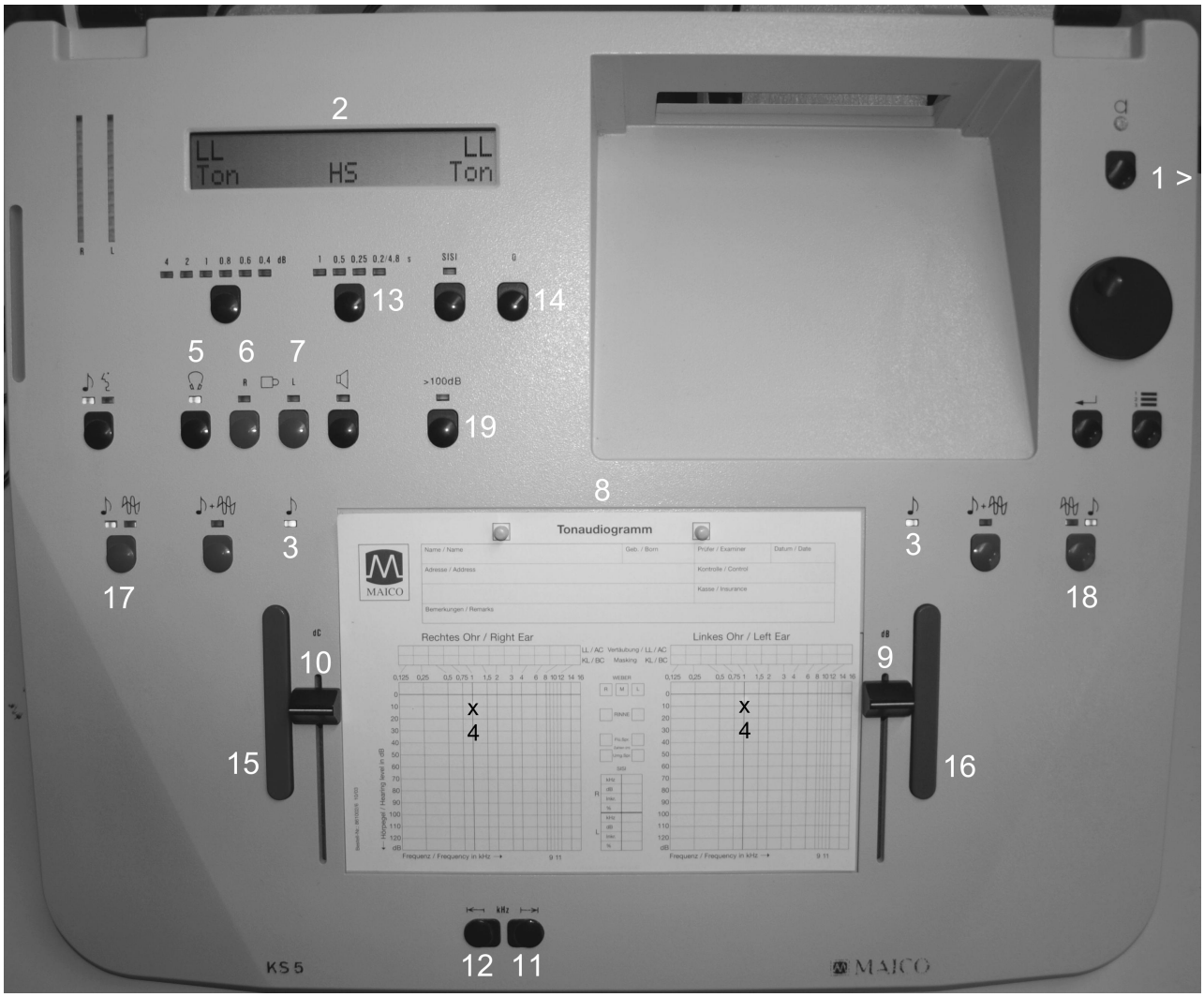


Abb. 2.1 Ansicht des Audiometers

1 Einschalten des Geräts (seitlich rechts, auf dem Bild verdeckt)
2 LCD-Anzeigefeld
3 Tonanzeigelampen rechts bzw. links
4 Leuchtpunkte (Anzeige von Frequenz und Pegel des Prüftons)
5 Anwahl: Luftleitung
6 Anwahl: Knochenleitung rechts
7 Anwahl: Knochenleitung links
8 Feld für Audiogrammkarten
9 Pegelschieber links
10 Pegelschieber rechts
11 Anwahl der hohen Prüffrequenzen
12 Anwahl der tiefen Prüffrequenzen
13 Anwahl: Pulston
14 Ausschalten Pulston
15 Tonunterbrechung rechts (knackfrei)
16 Tonunterbrechung links (knackfrei)
17 Umschaltung: Ton/Rauschen rechts
18 Umschaltung: Ton/Rauschen links
19 Prüftonerweiterung bis 120 dB

Mit der Taste "1" schalten Sie das Gerät ein. **Etwa 10 min Aufwärmzeit abwarten!** Achten Sie dabei darauf, dass die Pegelschieber "9" und "10" für beide Seiten ganz oben (-10 dB HV) stehen. Nach kurzer Zeit zeigt das Gerät seine Standardeinstellung, und zwar leuchten die Tonanzeigelampen "3" links und rechts, die Punkte unter dem Audiogrammblatt auf dem Aufnahmefeld für Audiometerkarten "8" bei 1 kHz und -10 dB HV, und auf der LCD-Anzeige "2" ist an beiden Seiten "LL" (Luftleitung), darunter "Ton" (Tonaudiometrie) und in der Mitte "HS" (Hörschwellenmessung) zu lesen.

Probandensicherheit: Eine Schutzvorrichtung verhindert, dass beim Einschalten oder beim Umschalten von Luft- auf Knochenleitung ungewollt zu hohe Schallpegel an das Ohr des Probanden gelangen. Bei Pegelwerten von größer 70 dB wird beim Einschalten der Ton automatisch ausgeblendet. Beim Umschalten wird die Eingabe ignoriert und auf dem Feld "2" erscheint "Pegel zu groß". Schieben Sie den oder die Schieber "9" und "10" zurück auf -10 dB HV und führen Sie die Umschaltung erneut durch.

Versuchsablauf

Der Versuch ist von jedem Praktikanten durchzuführen. Dabei soll jeweils 1 Ohr vermessen werden (jeweils wechselseitig 1 VP, 1 VL). Sollte genügend Zeit zur Verfügung stehen, wird bei einigen Versuchspersonen auch das 2. Ohr vermessen.

Die Stecker des Kopfhörerpaares, des Knochenleitungshörers und der Signaltaste sind in die entsprechenden Buchsen des Audiometers gesteckt. **Bei Neueinschalten etwa 10 min Aufwärmzeit abwarten!** Mit der Taste "1" das Gerät einschalten, mit "2" die Tonaudiometrie und mit "5" die kontinuierliche Tondarbietung über Kopfhörer anwählen (Nummern siehe Beschreibung zu Abb. 2.1).

Die VP setzt die Kopfhörer auf (auf guten Sitz achten, d. h. den Kopfhörerbügel so einstellen, dass die Schallaustrittsöffnung in der Hörermuschel möglichst genau dem Gehörgang gegenüber liegt): **r**echtes Ohr **r**ote Marke, linkes Ohr blaue Marke. Brillenträger legen die Brille ab. Die VP sitzt mit dem Rücken zum Gerät und hat die Signaltaste in der Hand. Überprüfen Sie, ob die Taste für Luftleitung "5" gedrückt ist.

Die Messungen beginnen jeweils bei 1 kHz. Zunächst werden mit der Taste "11" die hohen Frequenzen bis 12 kHz, danach mit der Taste "12" die tiefen bis 125 Hz gewählt. Am jeweiligen Ende des Frequenzbereichs wird durch erneutes Drücken der Tasten "11" bzw. "12" der Rücksprung auf 1 kHz bewirkt.

Zur Prüfung der Luftleitung schieben Sie den Schieber "9" oder "10" (Prüfung des rechten oder des linken Ohrs) allmählich nach unten; damit erhöhen Sie die Lautstärke des Prüftons. Wenn der Proband den Ton gerade leise hört (Hörschwelle), soll er sich über die Signaltaste melden. Dabei blinkt der jeweilige Leuchtpunkt "4" unter der Audiogrammkarte. Zusätzlich erscheinen im LCD-Feld "2" zwei schwarze Rechtecke. Nach Markierung des ermittelten Schwellenwertes schieben Sie den Schieber wieder zurück und wählen eine neue Frequenz. Sollte genügend Zeit zur Verfügung stehen, bestimmen Sie den Schwellenwert bei der gleichen Frequenz ein zweites Mal, da oft dann der Pegel schon bei einem niedrigeren Wert erkannt wird.

Zur Überprüfung der Irrtumslosigkeit Ihres Probanden bei der Empfindung des jeweiligen Testtons können Sie den dargebotenen Prüfton mit den Tasten "15" und "16" (für jeweils rechtes oder linkes Ohr) knackfrei unterbrechen. Sollte der Proband bei Betätigung einer dieser Tasten weiterhin signalisieren, auf dem entsprechenden Ohr etwas zu hören, so liegt ein Hörirrtum vor.

Zur Prüfung der Knochenleitungshörschwelle setzen Sie den Knochenleitungshörer dem Probanden so auf, dass die flache Schallgeberseite am Mastoid, hinter der Ohrmuschel, plan anliegt. Die andere Bügelseite liegt dem Gegenohr auf. Zur Vermessung des rechten Ohrs drücken Sie die Taste "6", zur Vermessung des linken die Taste "7". Jetzt führen Sie die Messungen wie bei der Luftleitung durch.

Ergebnisnachweis

Die Audiogrammkarte mit den Luft- und Knochenleitungswerten ist in das Protokoll einzukleben.

Verbinden Sie die Messwerte auf der Audiogrammkarte nach Anweisung und kleben Sie die Karte in das Protokoll ein.

Bitte hier die Audiogrammkarte einkleben

Achtung:

Traten stärkere Hörverluste auf? Falls ja, notieren Sie den Frequenzbereich und interpretieren Sie den Hörverlust als Folge eines Mittelohr- oder Innenohrschadens.

☐ nein, kein Hörverlust

☐ ja

Begründung:

Hörverlust bei Frequenz(en) .....

vermutlich ein .....-Schaden

4. Weberscher Versuch, Rinnescher Versuch

Versuchsziel

Es soll die Schallleitung durch das Mittelohr und durch den Schädelknochen geprüft werden.

Thematische Stichwörter

Luftleitung, Knochenleitung, Rinnescher Versuch, Weberscher Versuch, Lateralisation

Geräte

Stimmgabel, Anschlaghämmerchen

Versuchsablauf

Der Versuch ist von allen Praktikanten als Demonstrationsversuch durchzuführen.

Weberscher Versuch: Die angeschlagene Stimmgabel wird mit ihrem Fuß auf die Schädelmitte gesetzt. Dadurch wird der Schall über Knochenleitung beiden Innenohren gleich stark zugeführt. Vom Gesunden wird der Ton in beiden Ohren gleich laut empfunden, und die Schallquelle scheint in der Mitte des Schädels zu liegen. Dann wird jeweils der rechte bzw. linke Gehörgang mit dem Finger verschlossen und der Stimmgabelversuch wiederholt.

Rinnescher Versuch: Man vergleicht, wie lange man eine Stimmgabel bei Knochen- und Luftleitung mit jedem Ohr hören kann. Die angeschlagene Stimmgabel wird mit dem Fuß auf den Warzenfortsatz gesetzt (Knochenleitung). Sobald man den Ton nicht mehr hört, hält man die Zinken der Gabel direkt vor das Ohr (Luftleitung). Wird der Ton dann wieder gehört, sagt man, der Versuch ist positiv ("Rinne positiv"), anderenfalls ist er negativ ("Rinne negativ"). Anschließend wird ein Gehörgang durch Zuhalten verschlossen und der Versuch auf dieser Seite wiederholt.

Ergebnisnachweis

Die Lateralisation der Schallempfindung bei den simulierten Störungen der Schallleitung ist anzugeben.

Luft- und Knochenleitung

Weberscher Versuch	Schallempfindung
Schallleitungsstörung rechts	rechts / links
Schallleitungsstörung links	rechts / links

Wie würde das Ergebnis bei Innenohrschaden ausfallen?

Rinnescher Versuch	Ton länger zu hören bei
offener Gehörgang	Luftleitung / Knochenleitung
verschlossener Gehörgang	Luftleitung / Knochenleitung

Wie würde das Ergebnis bei Innenohrschaden aussehen?

Platz für Notizen

TEILVERSUCH II: GESICHTSSINN

GK 16.1.2

Lehrbücher: Speckmann / Hescheler / Köhling, 5. Aufl., Kap. 3.3
Klinke / Pape / Kurtz / Silbernagl, 6. Aufl., Kap. 21
Schmidt / Lang, 30. Aufl., Kap. 18

Fallbeispiel: Eine Patientin berichtet beim Augenarzt. "Plötzlich hat es auf der Kreuzung gekracht. Ich habe den Wagen des Unfallgegners nicht von rechts kommen sehen. Der Fahrer dieses Wagens hat gesagt, ich soll mir eine Brille kaufen, und deswegen bin ich jetzt hier". Der Augenarzt überprüft u. a. die Sehleistung der Patientin mit einer Sehprobentafel und spiegelt ihr Auge, ohne einen pathologischen Befund zu erheben. Nach einer Reihe weiterer Untersuchungen bestimmt er ihr Gesichtsfeld mit einem Perimeter. Aufgrund der Unfallschilderung vermutet er, ihr Gesichtsfeld könne eingeschränkt sein. Bei der Untersuchung am Perimeter zeigt sich, dass seine Vermutung zutrifft. Die Gesichtsfeldgrenze ist bitemporal (Normalwert etwa 100°) auf etwa 50° eingeschränkt. Seine Verdachtsdiagnose: 'Bitemporale Hemianopsie aufgrund einer Kompression des Chiasma opticum' wird durch den Befund erhärtet, dass die Sella turcica erweitert ist.

Aufgaben des Teilversuchs Gesichtssinn

1. Perimetrie des Gesichtsfeldes des Menschen

Aufgabe:

Die Perimetrie ist die Bestimmung des monokularen Gesichtsfeldes. Hierbei sind die äußeren Grenzen des Gesichtsfeldes und Bereiche mit Gesichtsfeldausfällen (Skotome) zu bestimmen.

Stichwörter:

Rezeptortopographie der Netzhaut; Sehbahn, retinotope Organisation der Sehbahn; monokulares und binokulares Gesichtsfeld, Farbengesichtsfeld; Systematik der Gesichtsfeldausfälle (Skotome), blinder Fleck; Blickfeld.

Gerät: Tübinger Automatik Perimeter

Versuchsanordnung und Messprinzip:

Verwendet wird ein Perimeter (Abb. 2.2, 2.3, 2.4). Weiße Lichtmarken (a) definierter Größe und Leuchtdichte werden in zufälliger Reihenfolge auf 68 definierte Positionen der Innenfläche der konstant beleuchteten Hohlkugel projiziert. Das zu untersuchende Auge befindet sich zentriert im Mittelpunkt der Perimeter-Hemisphäre. Der Untersuchungsabstand beträgt 30 cm. Die Fixation erfolgt auf eine Anordnung aus 4 Leuchtdioden, die nur dann alle sichtbar sind, wenn das Auge exakt zentriert ist. Durch eine Fernsehkamera und einen Bildschirm kann der Untersucher die Fixation kontrollieren, das Auge richtig zentrieren und den Pupillendurchmesser mit einem Maßstab bestimmen.

Nimmt der Proband einen der projizierten Punkte in der Hohlkugel wahr, so betätigt er einen Knopf und die Position des erkannten Punkts wird von einem Computer gespeichert. Aus der Auswertung der wahrgenommenen Punkte ergibt sich das Gesichtsfeld, das in Form eines Perigramms ausgedruckt wird. Vor-

aussetzung einer exakten Perimetrie sind Korrektur des dioptrischen Apparates, definierter Adaptationszustand, definierte Größe und Leuchtdichte der Lichtreize.

Abb. 2.2 Tübinger-Automatik-Perimeter

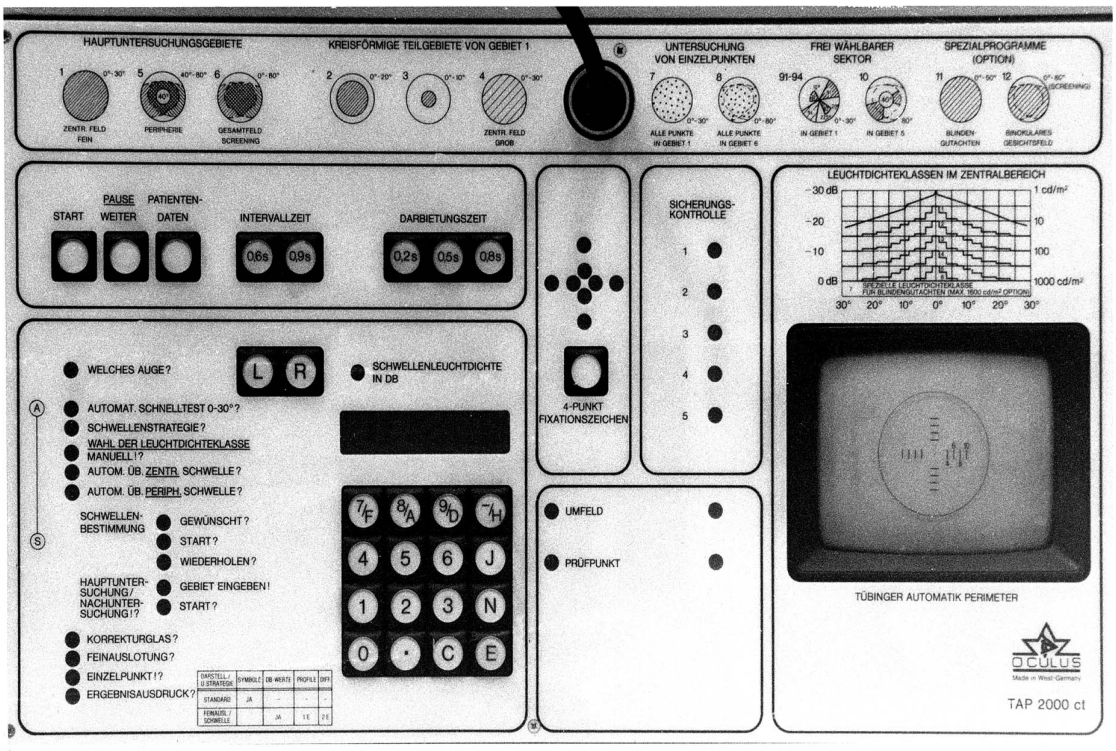


Abb. 2.3 Bedienfeld des Tübinger-Automatik-Perimeters (TAP)

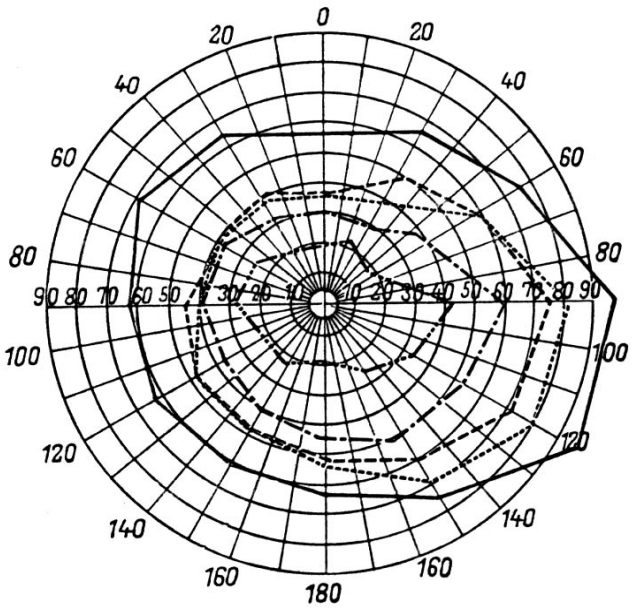


Abb. 2.4 Muster eines typischen Perigramms

Grenzen des Gesichtsfelds für die einzelnen Farben:
——— Schwarz-weiß-Wahrnehmung (Praktikumsversuch),
..... gelb, – – – blau, – · – · – · rot, – · · · – · · · grün

Aufgabenverteilung:

Der Versuch ist für jeden Praktikanten durchzuführen (jeweils wechselweise als Versuchsperson und Versuchsleiter).

Durchführung:

Die Versuchsperson platziert ihr Kinn auf der Kinnstütze und legt die Stirn gegen die Stirnstütze; der Versuchsleiter zentriert das Auge der Versuchsperson (Seiten- und Höhenverstellung) und misst den Pupillendurchmesser. Nach Positionierung des Probanden wird das Gerät durch Betätigung des Startknopfs im Bedienungsfeld aktiviert, das zu untersuchende Auge ausgesucht, die Option Schnelltest mit Nein = N beantwortet und ebenso die manuelle Leuchtklassenbestimmung. Beantworten Sie die Frage „Automatisch über zentraler Schwelle?“ mit Ja = J und starten Sie die Schwellenbestimmung. Ist diese Messung nicht gelungen, so wiederholen Sie die Prozedur. Anschließend folgt die Hauptuntersuchung. Dazu müssen Sie festlegen, welche Leuchtklassendichte die Reize haben sollen und in welchem Winkel zur Hauptachse Auge-Zentrierpunkte der Hohlkugel die Reizpunkte erscheinen können. Sie wählen 6 E und legen damit fest, dass 68 Punkte auf der gesamten Fläche der Hohlkugel erscheinen sollen.

Mit den Tasten ”Pause” und ”Start” können Sie zum Ausgang des Hauptuntersuchungsganges zurückkehren und mit erneutem Druck der Taste ”Start” die Untersuchung von neuem beginnen. Am Ende der Untersuchung wird die Gesichtsfeldkarte (Perigramm) automatisch ausgedruckt.

Ergebnisnachweis:

Kleben Sie bitte eine Gesichtsfeldkarte mit den eingezeichneten Gesichtsfeldgrenzen für Weißlicht definierter Größe und Helligkeit (Isopteren) ein.

Untersucht wurde das rechte / linke Auge, Pupillendurchmesser: _____ mm

Gesichtsfeldvordruck mit den im Versuch bestimmten Gesichtsfeldgrenzen bitte einkleben

Hier bitte den Gesichtsfeldvordruck einkleben

Markieren Sie bitte den blinden Fleck.

Bei wie viel Grad liegt er? _____ °

Wie viel Grad Ausdehnung hat er? _____ °

2. Bestimmung der Dunkel-Adaptationskurve

Fallbeispiel: Ein 40-jähriger Patient mit nicht ausreichend behandelten Fettverdauungsstörungen klagt bei seinem Augenarzt, dass er sich nachts in der Dunkelheit kaum orientieren könne und ständig über Hindernisse auf der Straße stolpere, wenn seine Frau ihn nicht rechtzeitig warne. Am Tag habe er Adleraugen. Der Augenarzt überprüft die Reizschwelle für Lichteindrücke und misst seine Adaptationsgeschwindigkeit. Dabei zeigt sich eine erhöhte Reizschwelle und eine verlangsamte Adaptation. Aufgrund der Anamnese vermutet der Arzt einen Mangel an fettlöslichem Vitamin A, das u. a. für den Aufbau von Sehfarbstoffen benötigt wird. Tatsächlich findet sich ein erniedrigter Vitamin A-Spiegel im Blut, der nach Therapie der Fettverdauungsstörungen und Vitamin A-Gabe wieder in den Normbereich von 1-8 µmol/l ansteigt. Parallel mit diesem Anstieg verschwindet auch die Nachtblindheit (Hemeralopie).

Aufgabe:

Der Zeitverlauf der Anpassung der retinalen Lichtempfindlichkeit an verschiedene Umweltleuchtdichten wird am Beispiel der Dunkeladaptation gemessen.

Stichwörter:

Messgrößen der Photometrie. Merkmale der Stäbchen und Zapfen: Sehfarbstoffe, spektrale Empfindlichkeit, Verteilung auf der Netzhaut. Hell- und Dunkel-Adaptation: Ausbleichen und Resynthese der Sehpigmente; Zeitgang; Unterschiede der Dunkeladaptation bei vorausgehender Helladaptation mit verschiedenfarbigem Licht, bei Nachtblindheit und totaler Farbblindheit. Sehschärfe und spektrale Empfindlichkeit bei photopischem und skotopischem Sehen; chromatisches Intervall. Primärprozesse, Bedeutung des Pupillenreflexes und der Organisation der rezeptiven Felder für die Helligkeitsanpassung.

Geräte:

Adaptometerkasten, Helladaptations-Vorrichtung, Stoppuhr

Versuchsanordnung und Messprinzip:

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Helladaptationseinrichtung (helle Lampe und diffus reflektierender Hintergrund) und aus einem Adaptometerkasten zur Messung der auf die Helladaptation folgenden Dunkeladaptation in Abhängigkeit von der Zeit. Im Adaptometerkasten ist ein rotes Fixationslicht so angebracht, dass das aus einer Mattglasscheibe bestehende Prüffeld extrafoveal gesehen wird. Die Verstellung der Helligkeit des Prüffeldes geschieht mittels eines Graufilterkeils mit seitlich herausragendem Schieber, der sich zwischen Prüffeld und Lichtquelle befindet. Der langgestreckte Graukeil ist in Bezug auf die Skala des Schiebers so geeicht, dass 0 die größte Durchlässigkeit und die Zahlen 0,5 - 6,0 den dekadischen Logarithmus der Intensitäts-Abschwächung angeben (d.h. 3 entspricht einer Leuchtdichteabschwächung auf $1/10^3 = 1/1000$).

Das Messprinzip besteht in einer subjektiven Schwellenbestimmung der Helligkeitswahrnehmung.

Aufgabenverteilung:

Der Versuch ist je einmal für 2 Praktikanten durchzuführen (1 Versuchsleiter, 1 Versuchsperson). Beide werten für ihre Protokolle dieselben Daten aus. Bei einer ungeraden Anzahl von Praktikanten ist der Versuch zusätzlich noch ein weiteres Mal durchzuführen.

Durchführung

Die Versuchsperson blickt für 5 min in die Helladaptationsvorrichtung. Währenddessen trifft der Versuchsleiter die folgenden Vorbereitungen:

- Der Graukeil des Adaptometers wird auf die geringste Durchlässigkeit (Skalenwert 6) gestellt.
- Die Demonstrations-Stoppuhr wird auf 0 zurückgestellt.

Nach Beendigung der Helladaptation begibt sich die Versuchsperson sofort zum Adaptometerkasten und fixiert von nun an den roten Lichtpunkt. Der Versuchsleiter setzt die Stoppuhr in Gang und führt gleichzeitig (t = 0) die erste Schwellenmessung durch. Weitere Messungen werden nach 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25 und 30 min durchgeführt. Die Ergebnisse werden in die Tabelle unten eingetragen.

Jede Schwellenmessung wird wie folgt vorgenommen:

Der Graukeil ist in der Zeit zwischen zwei Messungen immer auf "größte Abschwächung" (6,0) eingestellt.

Sobald der vorgegebene Zeitraum verstrichen ist, wird durch langsames Verschieben des Keils die Lichtabschwächung so weit vermindert, bis die Versuchsperson gerade die Helligkeit wahrnimmt. Selbstverständlich muss während der Messung weiter das Rotlicht fixiert werden, um zu garantieren, dass das retinale Bild auf der Mattscheibe extrafoveal liegt. Der Versuchsleiter liest den Abschwächungswert am Graukeil ab, trägt ihn in die Tabelle ein und schiebt den Keil wieder auf Stellung 6,0 zurück. Achten Sie darauf, dass der Raum möglichst abgedunkelt ist (höchstens Dunkelkammerleuchte und Perimeterbeleuchtung angestellt). Insbesondere die Helladaptationsanordnung kann, wenn sie angeschaltet bleibt, durch Streulichter den Versuch erheblich beeinträchtigen.

Ergebnisnachweis:

Die gemessenen Werte sind in die Tabelle einzutragen und in relative Schwellenreizstärken umzurechnen. Die Schwellenreizstärken werden in einem Diagramm gegen die Zeit aufgetragen.

Die im Versuch bestimmten Messwerte $M_{(t)}$ sind in die nachfolgende Tabelle einzutragen. Ein Messwert $M_{(t)} = x$ entspricht einer Abschwächung der maximalen Lichtintensität I_0 um den Faktor 10^{-x}. Die $M_{(t)}$-Werte werden umgerechnet in relative Schwellenreizstärken $S_{(t)}$.

Ausgehend von der (nicht vollständig zutreffenden) Annahme, dass nach 30 min bereits vollständige Dunkeladaptation erreicht ist, wird $S_{(t)}$ berechnet nach der Formel

$$S_{(t)} = M_{(30\ min)} - M_{(t)}$$

Eine Schwellenreizstärke $S_{(t)} = y$ bedeutet dann, dass zur Helligkeitswahrnehmung beim Zeitpunkt t eine um 10^y größere Lichtintensität nötig war als bei vollständiger Dunkeladaptation.

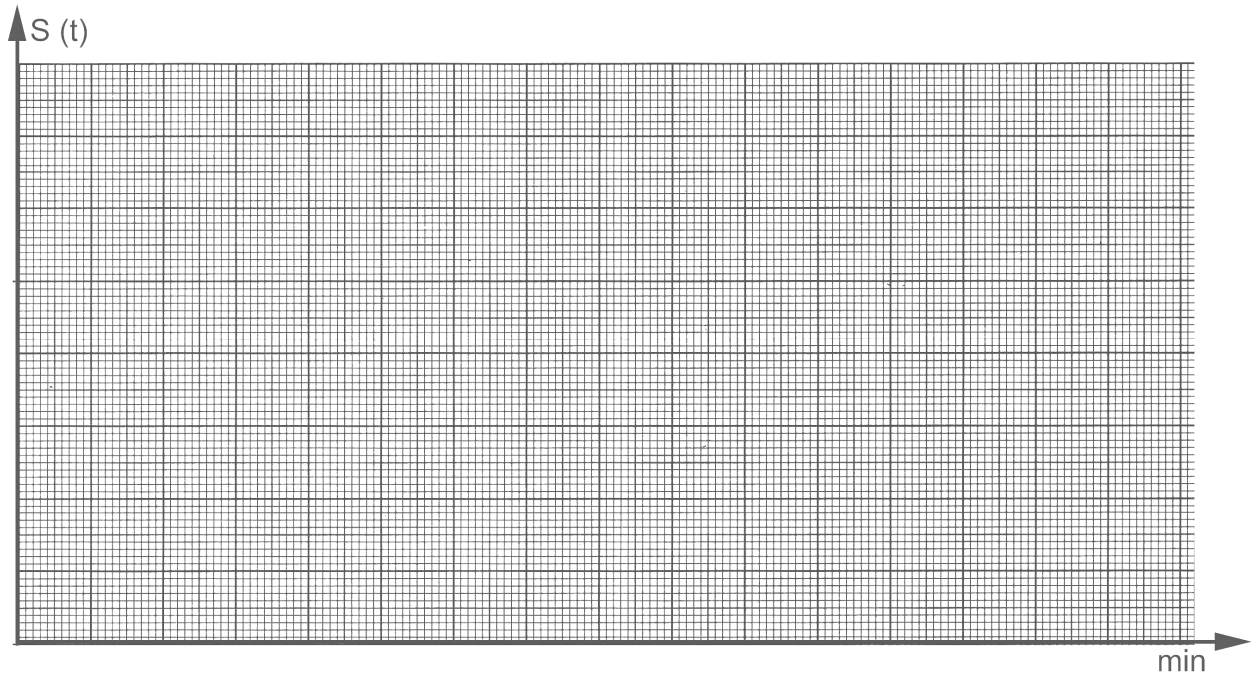
Name des Versuchsleiters:

Name der Versuchsperson:

Tabelle:

t (min)	$M_{(t)}$	$S_{(t)}$
0		
2		
4		
6		
8		
10		
12		
15		
20		
25		
30		

Die $S_{(t)}$-Werte (Ordinate) werden in dem nachfolgenden Diagramm in Abhängigkeit von der Zeit in Minuten (Abszisse) aufgetragen.



Kühn'sches Auge (optionaler Versuch)

Der Physiologe Kühne hat vor über hundert Jahren ein Augenmodell vorgestellt, mit dem er den Strahlengang im Auge demonstriert hat. In unserem Praktikum besteht dieses Modell aus einem Aquarium, das mit Fluorescein-haltigem Wasser gefüllt ist. An einer Stirnseite dieses Aquariums befindet sich in einer Halterung eine Sammellinse, die die dioptrische Rolle der Cornea übernehmen soll. Im Becken befindet sich eine weitere Sammellinse, die der Augenlinse in Ruhe entspricht. Durch Zusatz einer weiteren Linse an dieser Stelle wird ein Brechkraftzuwachs der Augenlinse bei Akkommodation simuliert. Es folgt schließlich eine Kunststoffscheibe, auf der eine scharfe Abbildung eines projizierten Gegenstands zu sehen ist, wenn die Linsen die richtige Dioptrienzahl haben und Linsen und Kunststoffscheibe sich an den dem Auge entsprechenden Positionen befinden. Da die Lichtstrahlen in der Fluorescein-Flüssigkeit durch die Seitenwände des Aquariums deutlich zu sehen sind, lässt sich leicht verfolgen, warum Abbildungen auf der Kunststoffscheibe unscharf werden, wenn sie zu weit von der Augenlinse entfernt ist. Der so entstandene Abbildungsfehler findet sich auch bei einer Achsenmyopie, die wie im Modell durch ein Zerstreuungsglas auskorrigiert werden kann. Analog sind alle gängigen Störungen des dioptrischen Apparats am Kühn'schen Auge zu studieren.

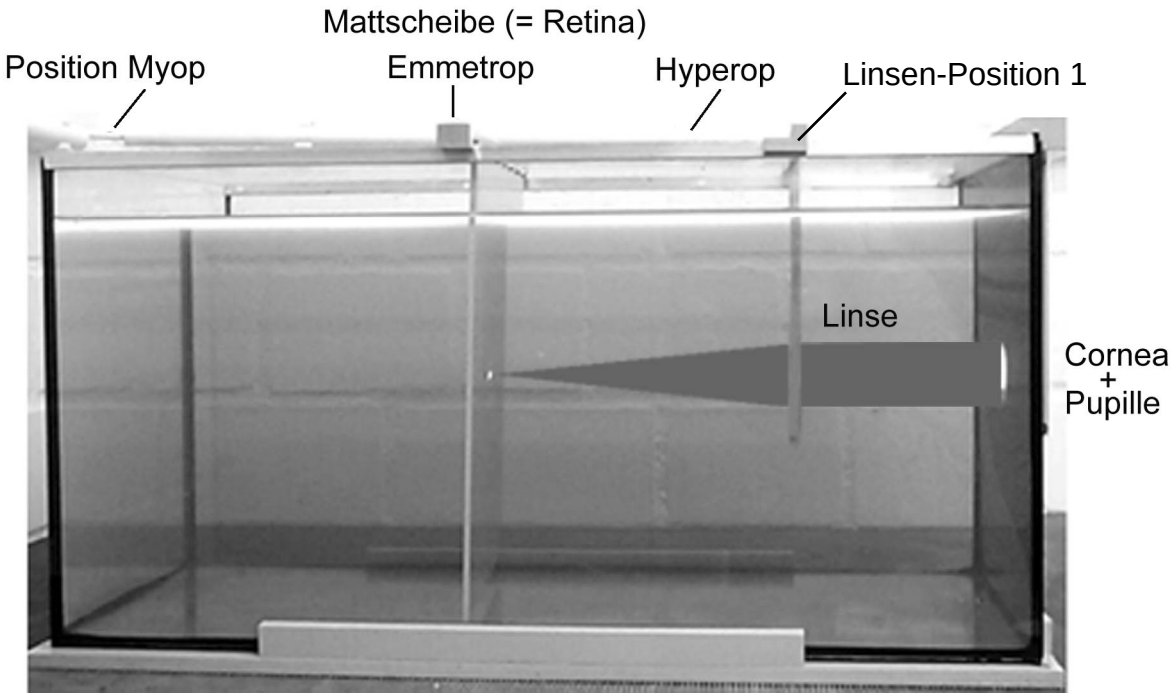


Abb. 2.5 Das Kühn'sche Auge

Aufgaben:

Verfolgen Sie im abgedunkelten Raum zunächst den Strahlengang von parallelem Licht, das auf die Frontlinse an der Stirnseite des Kühn'schen Auges fällt. Probieren Sie durch Umhängen der Kunststoffscheibe im Aquarium aus, wo Sie eine punktförmige Abbildung dieses Lichts auf der Kunststoffscheibe erhalten, wenn das Augenlinsenäquivalent sich in Position 1 des Aquariums befindet. Kann man auch eine Punktabbildung erhalten, wenn sich diese Linse vor oder hinter Position 1 befindet? Bitte notieren Sie Ihre Beobachtungen.

3. Ermittlung von Farbsinnesstörungen, Anomaloskop

Fallbeispiel: Eine Patientin mit Herzinsuffizienz erhält seit einigen Wochen Digitalis, das ihre Herzkraft deutlich verbessert hat. Sie hat sich nach Beginn der Digitalistherapie so gut gefühlt, als ob sie 10 Jahre jünger sei. Jetzt klagt sie aber bei einem Augenarzt über Sehstörungen und Kopfschmerzen. Die Farben ihrer Umwelt hätten sich irgendwie verändert. Sie meine, die Welt sei gelber geworden. Der Augenarzt überprüft nach einer allgemeinen Untersuchung ihrer Augen ihr Farbsehvermögen mit pseudoisochromatischen Tafeln, die die Patientin z. T. falsch liest. Daraufhin lässt ihr Arzt das Farbsehvermögen der Patientin noch einmal in einer Augenklinik an einem Anomaloskop überprüfen. Wieder wird eine Farbsinnstörung diagnostiziert. Da der Augenarzt aufgrund dieser Befunde eine Digitalisüberdosierung als Ursache vermutet, wendet er sich an den behandelnden Kardiologen, der die Dosis geringfügig reduziert, worauf die Beschwerden der Patientin verschwinden.

Überprüfung des Farbsinns und Analyse von Farbsinnesstörungen

Stichwörter:

Spektralbereich des Sehens, spektrale Farbenzuordnung, Komplementärfarben, additive und subtraktive Farbenmischungen, spektrale Hellempfindlichkeit bei photopischem und skotopischem Sehen. Retinale Mechanismen des Farbensehens, spektrale Empfindlichkeit der Zapfen, Organisation rezeptiver Felder für das Farbensehen, Gegenfarbenneurone.

Klassifikation der Farbsinnesstörungen. Häufigkeitsverteilung, Vererbungskomponente. Spektrale Farbenzuordnung und Empfindlichkeitsmaxima bei den Haupttypen der Fehlfarbsichtigkeit. Arbeitsmedizinische Bedeutung der Farbsinnesstörung. Diagnostische Methoden: Pseudoisochromatische Tafeln, Anomaloskop. Rayleigh-Gleichung als Basis der Anomaloskopie.

Geräte:

Heidelberger Anomaloskop, Isochromatische Farbtafeln

Versuchsanordnungen und Messprinzipien:

Zur ersten Diagnostik von Farbsinnstörungen werden in der Regel pseudoisochromatische Farbtafeln verwendet, in denen Farbtüchtige aus Anordnungen von Farbtupfen verschiedener Helligkeits- und Farbabstufungen Buchstaben oder Zahlen erkennen, die für Farbsinngestörte teilweise nicht zu lesen sind. Umgekehrt erkennen Farbsinngestörte in diesen Tafeln Buchstaben oder Zahlen, die Farbtüchtige nicht sehen.

Eine nähere Differenzierung von Farbsinnesstörungen erfolgt an einem Anomaloskop. Mit diesem Gerät werden der Testperson im Sekundenrhythmus alternierend ein weißer Vollkreis zur definierten Helligkeitsadaptation sowie zwei farbige Halbkreissegmente angeboten. Das eine halbmondförmige Segment zeigt ein monochromes Gelb, dessen Helligkeit (z. B. durch die Weite einer Blende) variiert werden kann. In einem zweiten halbmondförmigen Feld erscheint Rot, Grün oder eine Mischfarbe, die sich aus der Addition von rotem und grünem Spektrallicht ergibt. Nach der Rayleigh-Gleichung

Rot + Grün = Gelb

a (671) + b (546) = c (589) nm a, b, c = Gewichtungsfaktoren (relative Strahlungsintensitäten)

finden die meisten Versuchspersonen bei Veränderungen des Mischungsverhältnisses von Rot und Grün schließlich eine Mischfarbe, die gleich empfunden wird wie das monochrome Gelb im anderen Halbmond.

Ist die Versuchsperson "Rotschwach", wird sie konstant mehr Rot zumischen als ein normal farbtüchtiges Kollektiv, um beide Halbfelder als gleich zu empfinden. Ein "Grünschwacher" wird entsprechend mehr Grün zumischen.

Der Grad solcher "Anomalien" ergibt sich aus dem Anomalquotienten (AQ), in dem das gefundene Grün/Rot Mischungsverhältnis der Testperson (GT/RT) mit dem mittleren Mischungsverhältnis eines Normalkollektivs (GN/RN) verglichen wird.

$$\frac{G_T}{R_T} : \frac{G_N}{R_N} = \frac{G_T \cdot R_N}{R_T \cdot G_N} = AQ$$

Personen mit einem Anomalquotienten von 0 - 0,6 werden als Protanomale (Rotschwach) bezeichnet. Ist der AQ größer als 1,7, so hat die Testperson eine Deuteranomalie (Grünschwäche). Manche Testpersonen, denen ein Zapfenpigment fehlt, finden bei zahlreichen Grün/Rot-Mischungsverhältnissen, dass das Mischfeld und das Vergleichsfeld identisch aussehen. Zur weiteren Differenzierung wird ihr im Mischfeld ein reines Grün und alternativ ein reines Rot angeboten. Sie wird aufgefordert, durch Variation der Helligkeit im gelben Vergleichsfeld beide Halbfelder "gleich zu machen".

Ein normaler Farbtüchtiger und ein ”Anomaler” wird diese Aufgabe nicht ausführen können. Ein ”Anoper" wird dagegen bei wiederholter Ausführung eine konstante Gelbhelligkeit einstellen und anschließend die beiden Halbfelder als gleich deklarieren. Handelt es sich um einen ”Protanopen”, so wird er bei Grün im Mischfeld ein helles Gelb und bei Rot ein dunkles einstellen. Seine Helligkeitsempfindung für langwelliges "Rot" ist anomal gering, da ihm das für diesen Rotbereich empfindliche Zapfenpigment fehlt. Ein "Deuteranoper" wird dagegen ein helles Gelb einstellen, wenn ihm ein Mischfeld "Rot" angeboten wird. Normal Farbtüchtige werden ihm bestätigen, dass das von ihm eingestellte Gelb etwa die gleiche Helligkeit hat wie das vorgegebene Rot. Der ”Deuteranope” wird daher - anders als der "Rotblinde" ”Protanope” - langwelliges ”Rot” anhand der Helligkeit dieser Farbe erkennen können.

”Tritanomalien” und ”Tritanopie” (Gelb-Blau-Verwechsler) und ”Achromasie” (totale Farbblindheit) sind außerordentlich seltene Farbsinnesstörungen und sollen hier nicht berücksichtigt werden.

Versuchsdurchführung:

A) Lesen der Pseudoisochromatischen Tafeln

Jeder Kursteilnehmer soll bei Tageslicht oder tageslichtähnlichem Kunstlicht alle Farbtafeln lesen. Alle Lesefehler einer Testperson sind zu protokollieren und nach der folgenden Untersuchung am Anomaloskop zu deuten.

B) Untersuchungen am Anomaloskop

Vorbereitung des Geräts:

1. Nach dem Einschalten wählt das Gerät den Standarduntersuchungsgang Absolute Einstellbreite (ABS) und bietet das Grün/Rot-Mischungsverhältnis an, das von normal Farbtüchtigen als Gelb gesehen wird (40 "Einheiten"), und das Vergleichsgelbfeld, dessen Helligkeit normalerweise 15 "Einheiten" beträgt, wenn beide Halbfelder als gleich empfunden werden (Mittelnormgleichung).
2. Löschung von Daten aus Voruntersuchungen durch Drücken der Clear-Taste.
3. Einstellung der Okulare. Fokussierung bis zur scharfen Abbildung der beiden Halbfelder.

C) Messung:

1. Wird die Mittelnormgleichung akzeptiert, wird der akzeptierte Wert für jedes Auge durch Drücken der Taste Store gespeichert.
2. Erscheint das Mischfeld zu Grün, muss Rot zugemischt werden (Taste Rot +). Oft ist zusätzlich Reduktion der Gelbhelligkeit erforderlich (Taste Gelb -). Bei Annahme der Einstellungen Store-Taste drücken. Der AQ wird durch Betätigung der AQ-Taste ermittelt.

   Je geringer das Farbunterscheidungsvermögen ist, umso größer wird die Einstellbreite verschiedener Grün/Rot-Mischungsverhältnisse, die dem Vergleichsgelb scheinbar entsprechende Gelb-Werte ergeben. Die Einstellbreite wird durch die AQ_{max}- (maximal möglicher Rotanteil) und AQ_{min}-Werte (maximal möglicher Grünanteil) beschrieben.

Bei Tauglichkeitsuntersuchungen ist die stärkste Abweichung des AQ von 1 anzugeben.

Prüfung auf Anopie:

Durch Taste Rot max und alternativ Taste Grün max wird reines Rot oder reines Grün angeboten. Die Testperson soll versuchen, durch Variation der Gelbhelligkeit (Taste Gelb + oder Taste Gelb -) die beiden Halbfelder "gleich" zu machen. Wird bei Grün max eine Gelbhelligkeit von ca. 30 E und bei Rot max eine Helligkeit von 5 E eingestellt, liegt Protanopie vor. Ein Deuteranoper wählt bei beiden Farben Gelbhelligkeiten um 15 E.

Jeder Versuchsteilnehmer prüft seine Farbtüchtigkeit an einem oder (bei genügender Zeit) beiden Augen. (Vergleich mit den Werten anderer Gruppenmitglieder, insbesondere solcher, die sich als Farbsinngestörte an Anomaloskop und beim Lesen der Tafeln erwiesen haben!) Tragen Sie die Ergebnisse bitte ein.

Mischlicht Einheiten	Gelbhelligkeit Einheiten	AQ_{min}	AQ_{max}
VP1	15		
VP2	15		
VP3	15		
VP4	15		
VP5	15		
73 (Rot max)	VP1		
	VP2		
	VP3		
	VP4		
	VP5		
0 (Grün max)	VP1		
	VP2		
	VP3		
	VP4		
	VP5		

Sehschärfe und Akkommodation

Fallbeispiel: Die schulischen Leistungen einer 14-jährigen Schülerin haben sich in den letzten Monaten erheblich verschlechtert. Als die Eltern von ihr hören, dass sie kaum lesen könne, was die Lehrer an die Tafel schreiben, möchten sie das zunächst kaum glauben, weil ihre Tochter im Gegensatz zu ihnen selbst die kleinste Schrift im Kleingedruckten sicher entziffern kann. Dennoch gehen die Eltern mit ihrer Tochter zum Augenarzt, der bei ihr auf beiden Augen eine Kurzsichtigkeit = Myopie feststellt. Der Grad der Kurzsichtigkeit beträgt auf dem linken Auge 3, auf dem rechten Auge 4 dptr. Nach Korrektur dieser Fehlsichtigkeit durch Zerstreuungsgläser von -3 und -4 dptr sind die Probleme, die sie zum Augenarzt geführt haben, beseitigt.

Stichwörter zu den allgemeinen Grundlagen der Versuchsteile Sehschärfe und Akkommodation:

Dioptrischer Apparat des Auges, Brechkraft, Bildentstehung auf der Netzhaut; optische Messgrößen des Auges; physiologische Augenfehler.

4. Bestimmung der Sehschärfe

Zur Messung der Sehschärfe müssen standardisierte Methoden angewendet werden. Mit genormten Zeichen auf Sehschärfeprobentafeln wird die Visusbestimmung in der ärztlichen Praxis durchgeführt. Grundsätzlichere Aufschlüsse über die Sehschärfe sind durch Messungen der Auflösung zweier kleiner Punkte oder eines Konturensprunges möglich. Der Bereich der normalen Sehschärfe und ihre Abhängigkeit vom retinalen Ort und der räumlichen Struktur der Reize sollen festgestellt werden.

Stichwörter:

Refraktionsanomalien; Rezeptorverteilung auf der Netzhaut, rezeptive Felder retinaler Ganglienzellen; Visus.

Gerät: Sehschärfeprobentafel.

Versuchsanordnung und Messprinzipien:

Bei der Bestimmung des Visus (Sehschärfe an der Stelle des schärfsten Sehens) verwenden wir eine Sehschärfeprobentafel mit Landolt-Ringen (Abb. 2.6).

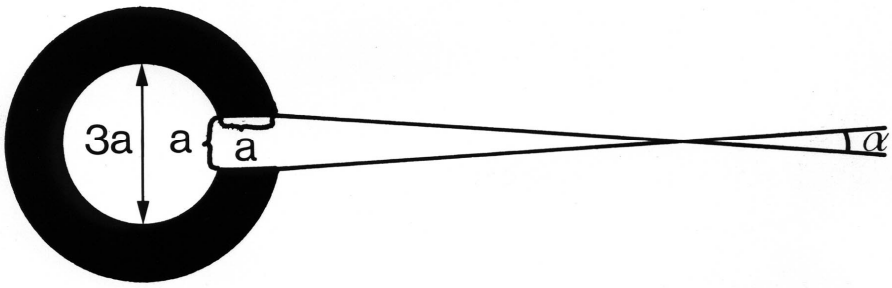


Abb. 2.6 Landolt-Ring

Landolt-Ringe sind Ringe der Dicke a mit einer lichten inneren Weite von 3a und einer Lücke der Weite a, die oben, unten, rechts oder links sein kann. Der Visus ist definiert als $V = 1/\alpha$ (Winkelminuten^{-1}), wobei α der Winkel in Winkelminuten ist, unter dem die Lücke a gesehen wird. Der Visus ist also 1, wenn die Lücke unter dem Winkel von 1 Winkelminute erkannt wird.

Aufgabenverteilung:

Der Versuch ist für jeden Praktikanten durchzuführen (jeweils wechselweise als VP und VL).

Durchführung

Brillenträger führen die Messungen mit Visuskorrektur durch. Die Dioptrienzahl der Brille oder Kontaktlinse ist im Protokoll zu vermerken. Sämtliche Teilversuche werden bei geringer Raumhelligkeit (rote Dunkelkammerbeleuchtung) und monokular durchgeführt. Das andere Auge wird durch eine Augenklappe verdeckt.

Visusbestimmung

Die Versuchsperson betrachtet aus 5 m Entfernung (Markierung auf dem Fußboden) monokular die Sehschärfeprobentafel. Der Versuchsleiter deutet auf verschiedene Landolt-Ringe, und die Versuchsperson teilt mit, in welche Richtung die Lücke in dem betreffenden Ring zeigt. So wird diejenige Zeile der Tafel ermittelt, bei der die Versuchsperson die Lücken gerade noch eindeutig erkennt. Neben den verschiedenen Zeilen sind die Entfernungen (D) in Metern angegeben, aus denen die Lücken in den Ringen gerade unter einem Winkel von einer Winkelminute gesehen werden. Die Zahl D neben der gerade noch mit Sicherheit erkannten Zeile wird notiert.

Die Sehschärfebestimmungen wurden durchgeführt am rechten Auge.

Korrektur: _____ dptr. (ggfs. Dioptrienzahl der Brille oder Kontaktlinsen _____ dptr.)

Der Visus V wird nach der Formel $V = \frac{D_b}{D\,1'}$ ermittelt.

D_b = Beobachtungsdistanz (5 m)
D1' = an der Sehprobentafel abgelesener Wert (Entfernung in m, aus der die Lücke unter dem Winkel von 1' (Winkelminute) gesehen wird)

gemessener Wert: D_b = _____ m Visus V = _____ Winkelminute $^{-1}$

5. Donders Optometer zur Bestimmung von Akkommodationsbreite, Nah- und Fernpunkt

Die Akkommodation stellt die Fähigkeit des dioptrischen Apparates des Auges dar, Gegenstände in verschiedenen Abständen jeweils scharf auf der Netzhaut abzubilden. Aus Nah- und Fernpunkt lässt sich die Akkommodationsbreite errechnen. Die Akkommodationsbreite ist altersabhängig. Eine Einschränkung der Akkommodationsbreite erfordert eine Korrektur (Nahbrille beim Alterssichtigen).

Stichwörter:

Brechkraft, Dioptrie, Nahpunkt, Fernpunkt; Mechanismus der Akkommodation; Refraktionsanomalien: Kurzsichtigkeit, Weitsichtigkeit, Alterssichtigkeit.

Versuchsaufbau und Messprinzip:

Verwendet wird ein Optometer nach Donders (Abb. 2.7).

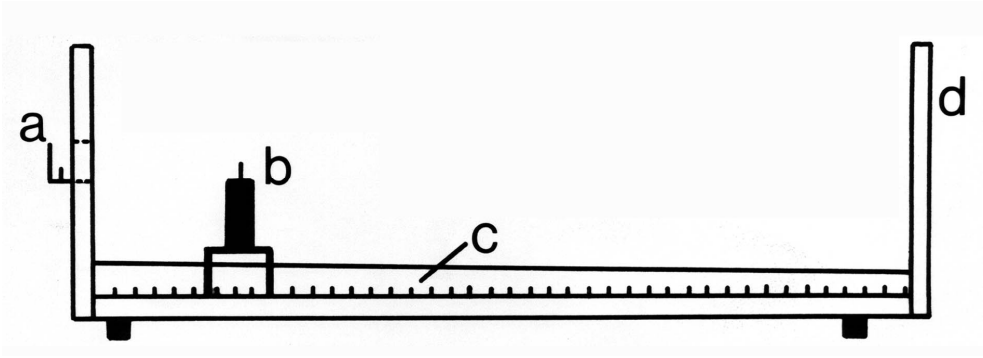
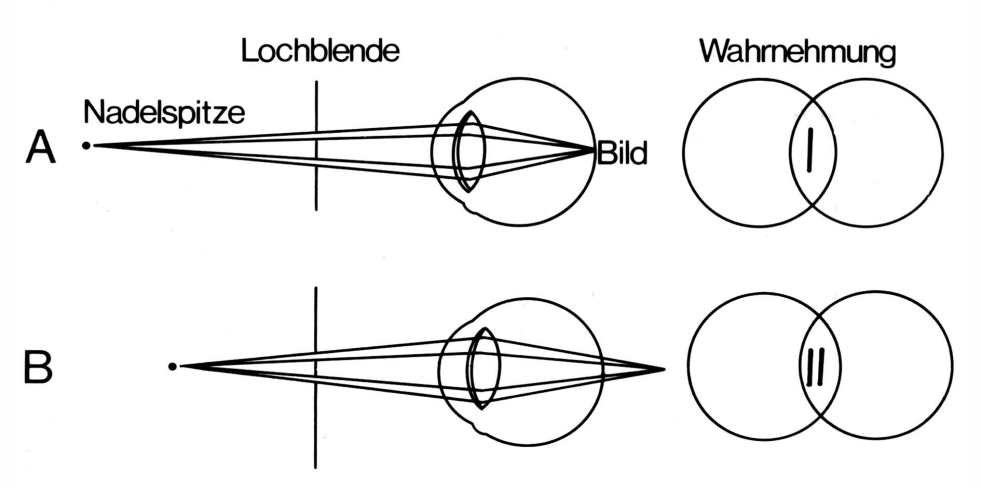


Abb. 2.7 Donders-Apparatur

Es besteht aus einem Messstab von einem Meter Länge (c), auf dem ein Reiter mit einer senkrecht stehenden Nadel (b) verschoben werden kann. An einem Ende des Messstabes befindet sich die Einblicköffnung mit Halter für Linse und Doppellochblende (a), auf der gegenüberliegenden Seite ist ein schwarzer Hintergrund angebracht (d). Das Messprinzip beruht auf der jeweiligen Überschreitung der oberen und unteren Brechkraftgrenzen der Linse des Auges, was bei der gegebenen Versuchsanordnung und bei der Verwendung der Doppellochblende durch Doppeltsehen der Nadelspitze feststellbar ist (Scheinerscher Versuch). Ein Beispiel für die Strahlengänge und die Wahrnehmungen bei der Nahpunktbestimmung gibt folgende Abb. 2.8:



Aufgabenverteilung:

Der Versuch ist für jeden Praktikanten an einem Auge durchzuführen (jeweils wechselseitig als Versuchsperson und Versuchsleiter).

Durchführung:

a) Nahpunktbestimmung:

Die Versuchsperson blickt mit einem Auge so durch die Doppellochblende, dass sie die in 30 - 40 cm Entfernung stehende Nadel im Überschneidungsbereich der beiden Abbildungen der Löcher auf der Netzhaut scharf sieht (Abb. 2.8). Nun wird die Nadel vom Versuchsleiter langsam näher zum Auge hingeschoben. Die Versuchsperson konzentriert sich darauf, die Nadel auch weiterhin scharf zu sehen. Es wird der Abstand gemessen, bei dem die Versuchsperson gerade die Nadel doppelt zu sehen beginnt. Der Abstand (A_n) wird unten notiert. Der Versuch wird in jedem Fall ohne Brille durchgeführt. Kontaktlinsen brauchen nicht abgenommen zu werden, ihre Dioptrienzahl ist im Protokoll zu vermerken.

b) Fernpunktbestimmung:

Der Fernpunkt liegt nur bei Kurzsichtigen im Bereich der "Messeinrichtung". Wir müssen daher Normalsichtige und Weitsichtige erst künstlich myop machen, um ihren Fernpunkt bestimmen zu können: Dies geschieht durch Vorsetzen einer +2 dptr.-Sammellinse (bei Weitsichtigen einer +4 dptr.-Linse). Nachdem diese Linse in den Halter (a in Abb. 2.7) eingesetzt wurde, wird die Fernpunktbestimmung vorgenommen. Gemessen wird derjenige Abstand der Nadel vom Auge, bei dem die Nadel während zunehmender Entfernung beginnt, gerade doppelt zu erscheinen. Abstand (A_f) notieren.

Untersucht wurde das rechte / linke Auge. Kontaktlinse:
a) Nahpunktbestimmung b) Fernpunktbestimmung
Messwert (A_n): Messwert (A_f):
Die Testperson war somit _____ -sichtig mit einer Abweichung von _____ dptr. (Bitte evtl. Kontaktlinse berücksichtigen)

Auswertung:

Die Werte A_n und A_f werden nun in Dioptrien (Kehrwert der in m gemessenen Brennweite) umgerechnet ($D = 1/A$ (m^{-1})) und ergeben damit D_n (den Dioptrienwert des Nahpunktes) und D_f (den Dioptrienwert des Fernpunktes bei einem Kurzsichtigen ohne vorgesetzte Linse) bzw. den Wert D'_f (den Dioptrienwert des Fernpunktes bei Normal- und Weitsichtigen mit der vorgesetzten Linse der Brechkraft (D_1 = +2 dptr. bzw. +4 dptr.). Bei der Berechnung der Akkommodationsbreite in Dioptrien muss bei normal- und weitsichtigen Personen die Brechkraft D_1 der bei der Fernpunktbestimmung vorgesetzten Linse von dem errechneten Wert D'_f abgezogen werden. Die Akkommodationsbreiten ergeben sich also aus den Differenzen von D_n und D_f auf folgende Weise:

$D_{ab} = D_n - D_f$ bzw. $D_{ab} = D_n - (D'_f - D_1)$

Geben Sie die von Ihnen gemessenen Werte für Nah- und Fernpunkt an. Bestimmen Sie die Akkommodationsbreite. Vergleichen Sie den von Ihnen gemessenen mit dem für Ihre Altersklasse typischen Wert mithilfe der ausliegenden Normkurve.

Berechnung der Akkommodationsbreite

Nahpunkt A_n = _____ m entspricht D_n = _____ dptr.

Fernpunkt A_f = _____ m entspricht D'_f = _____ dptr.

vorgesetzte Linse D_1 = _____ dptr.

insgesamt $D_f = D'_f - D_1$ D_f = _____ dptr.

Die Akkommodationsbreite betrug somit

$D_{ab} = D_n - D_f$ = _____ dptr.

Alter der Testperson: _____ Jahre

Die im Versuch gemessene Akkommodationsbreite wäre typisch für eine etwa _____-jährige Testperson.

6. Registrierung von Augenbewegungen

Untersuchung des optokinetischen Nystagmus

Beispiel einer klinischen Anwendung (Frau Prof. Dr. Timmann-Braun, Neurologie, Uniklinikum Essen)

Fallbeispiel: Eine 28-jährige Frau berichtet über Unwohlsein und Verschwommensehen beim Blick aus dem Fenster eines fahrenden Zuges. Sie gehe auch seit einigen Monaten unsicher, als ob sie betrunken sei. Der Neurologe stellt eine gestörte Augenbeweglichkeit und eine beginnende Stand- und Gangataxie fest und veranlasst zur genaueren Einordnung der Augenbewegungsstörung eine Elektronystagmographie. Die Untersuchung des optokinetischen Nystagmus (OKN) zeigt einen Zerfall des OKN. Die Fähigkeit, Reizmuster mit den Augen zu verfolgen (im Beispiel: Streifen nach rechts), ist verloren gegangen.

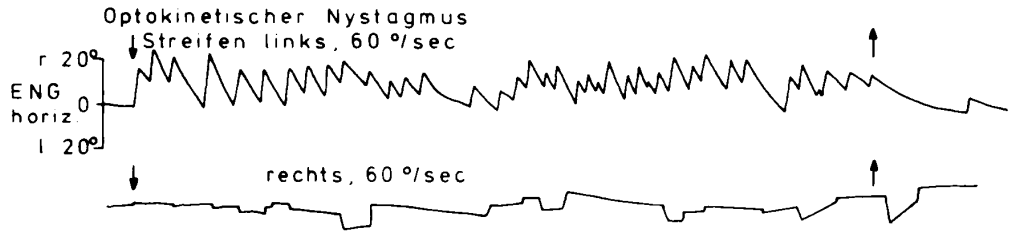


Abb. 2.9: Zerfall des optokinetischen Nystagmus bei Wanderung von Streifen nach rechts.

Anmerkung:

Kleinhirnläsionen beeinträchtigen die Augenbeweglichkeit in typischer Weise. Beide, die langsamen Augenfolgebewegungen und die schnellen Sakkaden, können gestört sein. Kleinhirnläsionen (insbesondere von Flokkulus und unteren Vermisanteilen) führen zu einer Minderung oder im schwersten Fall zu einem Zerfall des OKN. Die Patienten klagen über Probleme, bewegliche visuelle Reize zu verfolgen, z. B. beim Blick aus dem Zugfenster.

Bei dieser Patientin zeigte die Kernspintomographie eine Atrophie des Kleinhirns bei sonst unauffälligem Befund. Die Familienanamnese ergab, dass der Vater der Patientin im höheren Alter gangunsicher war. Die genetische Untersuchung bestätigte die Verdachtsdiagnose einer autosomal dominant vererbten Heredoataxie.

Stichwörter:

Steuerungszentren der Blickmotorik, optokinetischer und vestibulärer Nystagmus, Augenfolgebewegung, Sakkade, Konvergenzbewegung, Mikrotremor, Drift; Typen, Winkelgeschwindigkeit und Amplitude von Augenbewegungen: Sehen und Sehschärfe in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit der Augenbewegungen.

Geräte:

Motorgetriebener Streifenzylinder mit Schatten-Projektionseinrichtung, Projektionswand, Photozelle, 2-Kanal-Schreiber, Vorverstärker.

Versuchsanordnung und Messprinzip:

Das Auge stellt einen elektrischen Dipol dar, bei dem sich die Cornea positiv gegenüber der Netzhaut verhält. Diese elektrische Potentialdifferenz zwischen Cornea und Netzhaut nennt man das corneo-retinale Bestandspotential. Den Dipolcharakter des Auges kann man zur Messung von Augenbewegungen nutzen, wenn man die bei Blickrichtungsänderungen auftretenden Spannungsänderungen zwischen zwei ortsfesten Elektroden ableitet und verstärkt. In Abb. 2.10 ist die Lage der Elektroden zur Registrierung horizontaler Augenbewegungen schematisch dargestellt: Zwei Klebeelektroden befinden sich an den temporalen Rändern der Orbita rechts und links. Sie sind mit den Eingängen eines Differenzverstärkers verbunden (rechts +, links -). Eine auf der Stirn befestigte Klebeelektrode dient zur Erdung der Versuchsperson. Bewegen sich die vorderen Augenpole auf die rechte Elektrode zu, so entsteht eine positive Potentialdifferenz dieser Elektrode gegenüber der anderen. Bei der angegebenen Polung ergibt sich dadurch am Ausgang des Differenzverstärkers ein positiver Spannungswert, dessen Größe näherungsweise der Auslenkung der Blickachse nach rechts proportional ist. Entsprechend ergibt die Augenbewegung nach links einen annähernd proportionalen negativen Spannungswert. Wir können also mit dem ENG die zeitlichen Änderungen der Augenposition relativ zu den Kopfkoordinaten darstellen.

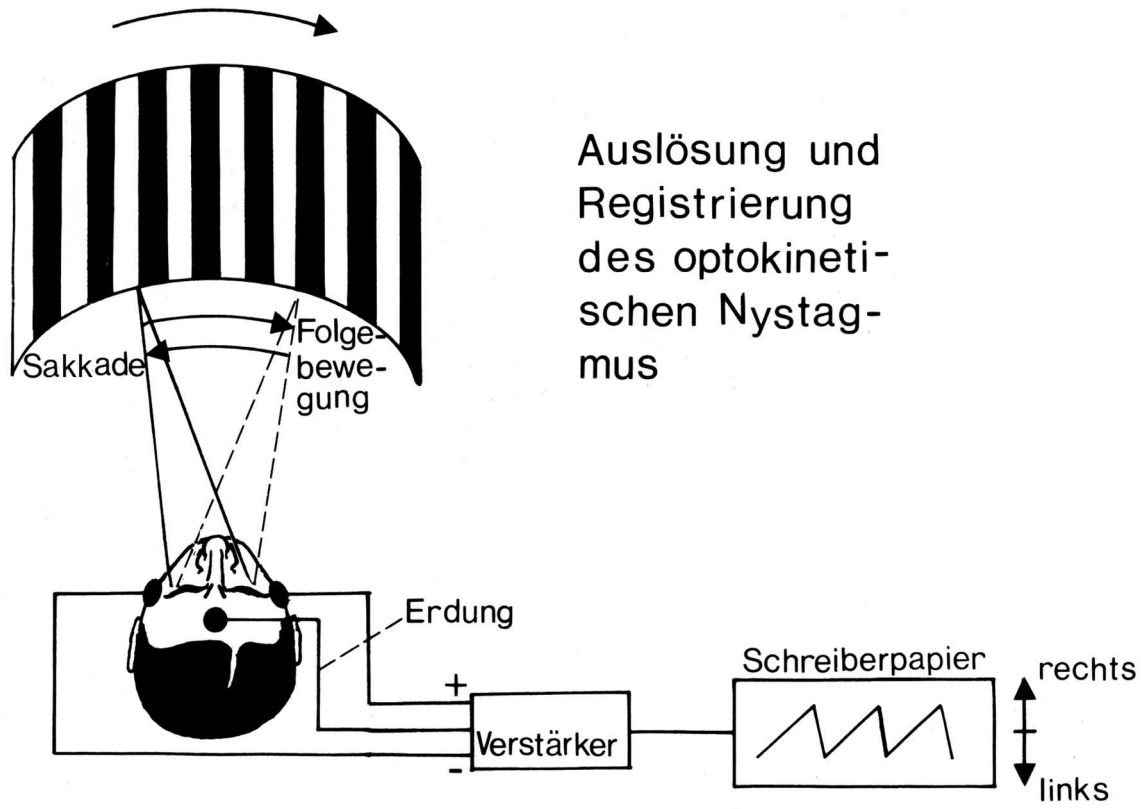


Abb. 2.10

a) Eichung und Messung der Winkelgeschwindigkeit einer Sakkade

Lassen Sie die Fixationsstreifen für 30° rechts und 30° links vor der Projektionswand herunter. Vorverstärker und Schreiber werden eingeschaltet. Die VP fixiert den rechten Streifen bei einer Papiervorschubgeschwindigkeit von 5 mm/s. Der Versuchsleiter dreht jetzt langsam am "POSITION"-Knopf des Verstärkers, bis sich die Schreibernadel, die sich vorher am rechten oder linken Anschlag befand, über das Schreibpapier bewegt. Mit dem Knopf "ZERO SUPPRESSION" des Schreibers erfolgt nun eine Feineinstellung der Nadel auf die linke Seite der Schreiberspur. Durch Blicken auf den linken und rechten Fixationsstreifen wird kontrolliert, ob die Schreibpapierbreite gut ausgenutzt ist.

Die Verstärkungsfaktoren von Vorverstärker und Schreiber sind so vorgegeben, dass normalerweise eine geeignete Verstärkung resultiert. Sollte sich bei der Eichung herausstellen, dass entweder die Schreibbreiten beide nicht optimal ausgenutzt oder aber überschritten werden, so kann die Endverstärkung über die Bedienungsknöpfe des Schreibers neu eingestellt werden. Die Eichung muss dann wiederholt werden. Nach der Beendigung des Eichvorganges dürfen weder die Verstärkerfaktoren noch die Lage der Klebeelektroden verändert werden!

Der Versuchsleiter stellt jetzt den Schreiber kurzfristig auf die Papiervorschubgeschwindigkeit von 50 mm/s und gibt sofort danach der Versuchsperson ein Kommando. Diese fixiert jetzt in sprungartigem Wechsel erst den linken und dann wieder den rechten Streifen. Der Schreiber wird sofort danach wieder angehalten. Papier sparen! Wiederholen Sie den Versuch bitte in derselben Weise viermal.

Kleben Sie bitte von allen Registrierungen Ausschnitte der Schreiberstreifen an den jeweils gegebenen freien Plätzen ein. Teilen Sie die Streifen dabei für jede Einzelaufzeichnung zu gleichen Teilen unter Versuchsperson und Versuchsleiter auf. Nehmen Sie die notwendigen Auswertungen an dem Ihnen zugänglichen Teil der Registrierung vor.

Bitte zeichnen Sie auf allen Registrierungen alle ausgewerteten Strecken ein und tragen Bezeichnungen und abgelesene Längen ein; markieren und kommentieren Sie Besonderheiten (z. B. Regressions- oder Sprungkorrektur-Sakkade).

a) Berechnung der Eichung und Messung der mittleren Winkelgeschwindigkeit einer Sakkade

Bitte hier die Sakkadenregistrierung einkleben

Eichung: 60° = _____ mm, 1 mm = _____ °

Vermessung von Sakkaden zwischen den Fixationspunkten 30° rechts und 30° links.
t ist die Zeit vom Beginn bis zum Ende der Sakkade.

	1. Sakkade (Hinsprung von re. nach li.)	2. Sakkade (Rücksprung von li. nach re.)
Benötigte Zeit t:	_____ mm ≙ _____ s	_____ mm ≙ _____ s
Überstrichener Winkel:	_____ mm ≙ _____ °	_____ mm ≙ _____ °

Winkelgeschwindigkeit: ω_1 = _____ °/s ω_2 = _____ °/s

b) Optokinetischer Nystagmus

Aufgabe:

Bei der Betrachtung eines horizontal bewegten, vertikalen Streifenmusters (Abb. 2.10) treten horizontale Augenbewegungen auf, die mit Hilfe des Elektronystagmogrammes (ENG) gemessen werden können. Der Nystagmus besteht dabei aus einer langsamen Augenfolgebewegung in Richtung der Streifenwanderung und einer schnellen Rücksprungphase (Sakkade). Einige Eigenschaften dieses optokinetischen Nystagmus sollen bestimmt werden.

Aufgabenverteilung:

Der Versuch ist je einmal für zwei Praktikanten durchzuführen, wobei einer als Versuchsperson und der andere als Versuchsleiter fungiert. Bei einer ungeraden Anzahl von Praktikanten ist der Versuch von 3 Personen durchzuführen (1 VP, 1 Praktikant am Streifenzylinder, einer am Schreiber). Es sind dann alle Registrierungen entsprechend zu verlängern, damit sie später auf die 3 Praktikanten verteilt werden können.

Messung des Nystagmus:

Die Fixationsstreifen werden von der Projektionswand entfernt. Der Motor und die Projektionslampe des Streifenzylinders werden eingeschaltet. Die Versuchsperson soll die Streifenwanderung auf der Projektionsfläche beobachten. (Sie darf dabei keinesfalls Kopf-, Kau- oder Sprechbewegungen ausführen.) Das dabei auftretende ENG wird auf der ersten Schreiberspur aufgezeichnet. Auf der zweiten Spur wird zugleich mithilfe der Photozelle die Streifenwanderung registriert. Dabei wird für jeden der 20 hellen Streifen des Zylinders beim Vorbeilaufen ein kurzer Spannungspuls aufgezeichnet.

Registrieren Sie das ENG der Versuchsperson über einen Zeitraum von etwa 15 s (bei einer Dreiergruppe 20 s). Die Papiervorlaufgeschwindigkeit des Schreibers beträgt dabei 25 mm/s. Danach werden Schreiber und Drehzylinder angehalten.

Nun berechnen Sie bitte die Winkelgeschwindigkeit der Streifenwanderung, die "Nystagmusamplitude" und die Winkelgeschwindigkeit der langsamen Augenfolgebewegung. Bezeichnen Sie Sakkade und Folgebewegung und geben Sie die Nystagmusrichtung an.

Aus der Registrierung sollen berechnet werden (Strecken bitte markieren):

t_S = Dauer von **5** Hell-Dunkel-Perioden _____ mm ≙ _____ s

Dann zeichnen Sie bitte die Strecke vom ersten bis zum sechsten Hell-Dunkel-Übergang ein

(I) F = Frequenz der Hell-Dunkeländerungen an der Photozelle _____ 1/s

(II) die Winkelgeschwindigkeit der Streifenwanderung $\omega_S = P \cdot F$ °/s = _____ °/s
(Wo P = räumliche Streifenperiode in Winkelgrad P = 18°)

(III) A_n = _____ mm ≙ _____ °
(Differenz der Augenauslenkung zu Anfang und Ende der Folgebewegung, umgerechnet nach der Eichung in Winkelgrade)

(IV) t_n = Dauer dieser Folgebewegung _____ mm ≙ _____ s

(V) die Winkelgeschwindigkeit dieser Folgebewegung, $\omega_n = A_n / t_n$ = _____ °/s

Sind ω_S und ω_n ungefähr gleich?

(Kanal 1) (Kanal 2)

ω_S =

A =

Bitte hier den Registrierstreifen einkleben

ω_n =

c) Registrierung der horizontalen Augenbewegungen beim Lesen

Die Versuchsperson liest lautlos die Zeilen des bereitliegenden Textes. Die Schreibergeschwindigkeit beträgt 25 mm/s.

Bitte kleben Sie die Registrierung der horizontalen Augenbewegungen beim Lesen auf. Markieren Sie bitte die Zeilenanfänge des Textes auf der Registrierung und geben Sie die Skalierung der Zeit sowie mithilfe der Amplitudeneichung die Amplitude der Augenbewegungen und deren Richtung an.

Bitte hier Registrierung einkleben

BLUT

GK 2.1 – 2.5.3

Lehrbücher: Speckmann / Hescheler / Köhling, 5. Aufl., Kap. 6
Klinke / Pape / Kurtz / Silbernagl, 6. Aufl., Kap. 7
Schmidt / Lang, 30. Aufl., Kap. 23

Fallbeispiel: Eine 23-jährige Studentin klagt über Abgeschlagenheit, verminderte Leistungsfähigkeit und Kurzatmigkeit bei Belastung. Die Anamnese ergibt keine weiteren Hinweise auf eine Erkrankung. Bei der körperlichen Untersuchung sind die Lungen ohne pathologischen Befund, die Herzfrequenz in Ruhe beträgt 92/min, über dem 2 ICR re lässt sich ein Systolikum auskultieren. Die Bestimmung des roten Blutbilds ergibt folgende Werte: Hb 95 g/l, Erythrozytenzahl $3{,}8 \cdot 10^{12}$/l, Färbeindex 26 pg, Erythrozytenvolumen 79 fl.

Zusätzlich durchgeführte Laboruntersuchungen zum Eisenstatus haben folgende Ergebnisse: Transferrin-Sättigung: 10 % (normal 16 – 45 %); Serum-Ferritin: 9 µg/l (normal: 22 – 112 µg/l)

Diagnose: Hypochrome, mikrozytäre Anämie
Wahrscheinliche Ursache der Anämie: Eisenmangel
Therapie: Orale Eisensubstitution

Wichtig:
Aus Sicherheitsgründen ist bei der Arbeit mit Körperflüssigkeiten (hier: Blut und Blutbestandteile) das Tragen von Kittel und Handschuhen zwingend vorgeschrieben. Essen und Trinken ist im Praktikumsraum absolut untersagt. Benutzte Kanülen und Lanzetten werden sofort in den dafür vorgesehenen Container entsorgt (Verletzungsgefahr, Infektionsgefahr!!).

Kenntnisse über folgende Themen werden vorausgesetzt:
Zusammensetzung des Blutes; Hämatokrit; Erythrozyten; Hämoglobin: Struktur und Funktion, Bestimmungsmethoden (Lambert-Beersches Gesetz); Erythrozytenparameter (mittleres corpusculäres Hämoglobin, mittleres Erythrozytenvolumen, mittlere corpusculäre Hämoglobinkonzentration); Anämieformen und ihre Ursachen; Blutsenkungsgeschwindigkeit, Agglomerine, Akute-Phase-Proteine; Blutgruppen: AB0/Rh-System); Leukozyten, Thrombozyten und Hämostase; Antikörper, Coombs-Test

Praktikumsversuche im Überblick:

1. Venenpunktion / Blutentnahme
2. Blutsenkung
3. Rotes Blutbild
4. Osmotische Resistenz
5. Blutgruppen
6. Coombs-Test
7. Blutungszeit und Gerinnungszeit
8. Quick-Test
9. Partielle Thromboplastinzeit

Praktikumsversuche

1. Blutentnahme aus der Vene

Die Teilnehmer/-innen des Praktikums punktieren sich gegenseitig die Venen der Ellenbeuge. Pro Person werden vier Monovetten (weiße Serum-Monovette, violette 1:5-Citrat-Monovette, rote Kalium-EDTA-Monovette, grüne 1:10-Citrat-Monovette) benötigt. Vor der Entnahme ist es wichtig, alles was benötigt wird, in Reichweite zu legen: Monovetten, Stauschlauch, Tupfer, Sprühdesinfektion, „Butterfly"-Kanüle, Adapter usw.

Direkte Venenpunktion

Bei der direkten Venenpunktion sticht man unmittelbar über dem Zielgefäß ein; die Kanüle nimmt den kürzesten Weg zwischen Epidermis und Gefäßlumen. Gerade der unerfahrene Punkteur ist geneigt, „sicherheitshalber" diesen Weg des Einstichs zu wählen. Die direkte Technik hat aber den Nachteil, dass in der Regel das Gefäß (in einem sehr steilen Punktionswinkel) zwar getroffen, aber dann häufig wegen der senkrechten Stichrichtung durchbohrt wird. Eine paravenöse Injektion oder ein Hämatom ist die Folge. Erschwerend kommt hinzu, dass die Vene sich im Moment der direkten Berührung kontrahieren kann, wobei nicht selten die zur eigentlichen Gefäßpunktion führende Stichrichtung abweicht. Ein weiterer Nachteil der direkten Methode ist der relativ kurze subkutane Gewebstunnel, der so als Keimbarriere an Widerstand einbüßt.

Indirekte Venenpunktion

Die indirekte Punktionsform erfolgt in zwei Schritten. Initial wird das Punktionsareal durch den gesäuberten nicht-dominanten Zeigefinger und Daumen des Punkteurs leicht gespannt. Etwa 1 bis 2 mm lateral des Gefäßes (oder besser distal einer Y-Konfluenz) wird die Haut in einem Winkel von 30° bis 45° durchstoßen. Anschließend wechselt der Zeigefinger palpierend an das zu punktierende Gefäß und führt den Stich fast oberflächenparallel weiter. Die Kanülenspitze wird flach durch das Subkutangewebe vorwärts geschoben und die (elastische) Venenwand des Gefäßes mit einem kleinen Ruck durchstoßen. Das Einfließen von Venenblut in die transparente Blutkammer der Kunststoffverweilkanüle oder in das Spritzenlumen lässt die korrekte Lumenpunktion sofort erkennen.

Blutentnahmesysteme mit Vakuum

Rote EDTA-Monovette

(Blutbild, osmotische Resistenz)
Die Röhrcheninnenwand ist mit K2-EDTA oder K3-EDTA (EDTA= Ethylendiamintetraessigsäure) beschichtet oder enthält eine wässrige Lösung dieses Antikoagulans. EDTA komplexiert Ca^{2+}-Ionen und blockiert so die Gerinnungskaskade.
- Auf rasche und sorgfältige Durchmischung von Blut und Antikoagulans achten (nicht schütteln!).
- Unterfüllung des Probengefäßes vermindert die Stabilität und den Hämatokrit.

Weiße Serummonovette

(Blutgruppe, Coombs-Test)
Das spezifische Gewicht der Kügelchen aus Polystyrol (Granulat) liegt zwischen dem des Blutkuchens und dem des Serums. Bei der Zentrifugation bildet das Granulat eine durchlässige Trennschicht zwischen Serum und Blutkuchen.

Lila Citrat-Monovette

(Blutsenkungsgeschwindigkeit)
Blutsenkungs-Röhrchen enthalten eine 3,8%ige (0,129 mol/l) gepufferte, wässrige Trinatriumcitratlösung. Das Mischverhältnis ist 1:5 (1 Teil Citratlösung zu 4 Teilen Blut).

Grüne Citrat-Monovette

(Gerinnung: PTT, Quick)
Citrat-Röhrchen beinhalten eine flüssige, gepufferte Trinatriumcitratlösung 0,109mol/l (3,2 %) oder 0,129 mol/l (3,8 %) und gewährleisten so ein für Gerinnungsanalysen erforderliches, konstantes Mischverhältnis von 1:10 (1 Teil Citratlösung zu 9 Teilen Blut).

Hinweise zur korrekten Verwendung

- Das Mischungsverhältnis von 1 Teil Natriumcitrat und 9 Teilen Venenblut ist exakt einzuhalten. Änderungen im Volumenverhältnis führen zu falschen Resultaten:

Mischungverhältnis	Quick (%)	aPTT (s)
1 + 9	100	38
1 + 8	98	39
1 + 7	94	41
1 + 6	89	44

- Reihenfolge der Befüllung beachten: Citrat-Röhrchen nicht als erstes Röhrchen abnehmen.
- Die Durchmischung des gewonnenen Blutes mit der Na-Citratlösung ist durch mehrfaches Kippen und Schwenken des Röhrchens (nicht schütteln!) sofort nach der Entnahme durchzuführen. Bei nicht sofortiger Durchmischung kann es durch mangelnden Kontakt mit dem Antikoagulans zur Teilgerinnung und damit zu falsch niedrigen Werten kommen.
- Bei hämolytischen Plasmen werden auch gerinnungsaktive Anteile der Erythrozyten gemessen.
- Blasen und Schaumbildung beim Aspirieren vermeiden.
- Unsachgemäße Venenpunktion (zu kleines Kanülenlumen) aktiviert Gewebsthrombokinasen.

2. Blutkörperchensenkungsgeschwindigkeit

(BSG; violette Monovette)
Aufgrund ihres höheren spezifischen Gewichtes sinken Erythrozyten im ungerinnbar gemachten (Zugabe von Natriumcitrat), nicht strömenden Blut ab. Es bilden sich reversibel zusammengelagerte Agglomerate von Erythrozyten, deren Größe von den im Plasma vorhandenen Agglomerinen (Plasmaproteine) abhängt. Zu den Agglomerinen gehören Immunglobuline, α_2-Makroglobulin und Fibrinogen, die bei entzündlichen neoplastischen Erkrankungen im Rahmen der Akute-Phase-Antwort des Immunsystems vermehrt gebildet werden. Die Bestimmung der BSG ist eine unspezifische Untersuchungsmethode, die sich für die Kontrolle des Krankheitsverlaufes in der klinischen Routine bewährt hat.

Durchführung

Die BSG wird bestimmt nach der Methode nach WESTERGREN mit Hilfe einer Sedimentierpipette (von 0 – 200 mm graduiert). Der Inhalt des BSG-Röhrchens (violett) wird durch mehrmaliges Kippen durchmischt und in die WESTERGREN-Sedimentierpipette gedrückt (vorsichtig drücken!). Diese wird genau senkrecht gestellt und nach einer Stunde die Höhe der erythrozytenfreien Plasmasäule notiert. Normalwerte für die BSG für den Mann sind bis 15 mm in einer Stunde, für die Frau bis 20 mm nach einer Stunde.

Blutsenkungsgeschwindigkeit:
Nach 1 Stunde: mm

3. Rotes Blutbild

Hämatokrit, Hämoglobinkonzentration, Erythrozytenzahl und abgeleitete Größen
(rote EDTA-Monovette)

3.1 Hämatokritbestimmung

Messprinzip

Unter Hämatokrit versteht man den Volumenanteil der Erythrozyten am Blutvolumen. Seine Bestimmung erfolgt durch Zentrifugieren des Vollblutes in einem Kapillarröhrchen, bis die Zellen fest gepackt ein Minimalvolumen einnehmen. Die Höhe der Zellsäule in Prozent der Höhe der Gesamtsäule gibt den Anteil des Erythrozytenvolumens am Blutvolumen an. Weil die Dichte der Zellpackung auch von der Dauer und Geschwindigkeit des Zentrifugierens abhängt, sind diese Parameter ebenso wie die verwendeten Mikrohämatokritkapillaren nach DIN standardisiert.

Geräte und Reagenzien

Heparinisierte Hämatokritröhrchen, Kittschale, Mikro-Hämatokritzentrifuge, sog. Ableseharfe

Durchführung

Zuerst füllt man die Hämatokritröhrchen (Doppelbestimmung!), wobei diese waagerecht gehalten werden sollen, um Luftblasen zu vermeiden. Die Röhrchen werden zu ¾ mit Blut gefüllt. Man lässt an beiden Enden etwas Luft und dreht die Kapillare in der Kittmasse, um sie an einem blutfreien Ende zu verschließen.

Die Kapillaren werden so in die Führung des Telleraufsatzes der Zentrifuge eingesetzt, dass die verschlossenen Enden am peripheren Gummiring anliegen.

Wichtig: Nummern notieren und die Zentrifuge symmetrisch beladen!

Nachdem alle Praktikumsteilnehmer ihre Hk-Kapillaren eingelegt haben, werden die Proben 10 min bei 13 000 Upm zentrifugiert.

Das Auswerten findet mit der Hk-Harfe statt. Man legt die Kapillare so auf die Harfe, dass der Kitt unter der 0%-Linie liegt und der Beginn der Ery-Säule genau auf der 0%-Linie; dann verschiebt man die Kapillare so weit, bis der Meniskus des Plasmaspiegels auf der 100%-Linie liegt. Jetzt kann man genau die Erythrozytensäule bis zum Rand der Linien verfolgen und den prozentualen Wert ablesen. Aus den Ergebnissen der Doppelbestimmung wird der Mittelwert gebildet und dimensionslos angegeben.

	Probe 1:	_____
Ergebnis	Probe 2:	_____
	Mittelwert:	_____

3.2 Hämoglobinbestimmung

Messprinzip

Bei Durchtritt von Licht einer bestimmten Wellenlänge durch die Lösung eines lichtabsorbierenden Stoffes wird ein Teil des Lichtes von den Molekülen dieses Stoffes absorbiert. Zwischen der Durchlässigkeit I/I_0 (Intensitätsverhältnis zwischen durchgelassenem und eingestrahltem Licht, auch Transmission genannt)

und der Konzentration des gelösten Stoffes besteht ein experimenteller Zusammenhang, der im Lambert-Beerschen Gesetz ausgedrückt wird:

$$I/I_O = 10^{-c \cdot d \cdot \varepsilon} \qquad (1)$$

Dabei ist c die Konzentration des untersuchten Stoffes in g/l, d die Schichtdicke der Messprobe in cm, ε der molare Extinktionskoeffizient. Dieser stellt eine charakteristische Größe der betreffenden Substanz für eine bestimmte Wellenlänge dar.

Wenn wir die Extinktion E als den negativen dekadischen Logarithmus der Transmission definieren

$$E = -\lg\frac{I}{I_0} = \lg\frac{I_0}{I} \qquad (2)$$

so ergibt sich durch Logarithmieren von Gleichung 1 folgender Zusammenhang zwischen Extinktion E und molarem Extinktionskoeffizienten ε:

$$E = c \cdot d \cdot \varepsilon \qquad (3)$$

ε kann also als diejenige Extinktion definiert werden, die die betrachtete Substanz bei einer Konzentration von 1 g/l und einer Schichtdicke von 1 cm bewirkt.

Extinktionsmessungen sind für Bestimmungen von Stoffkonzentrationen gut geeignet, da nach Gl. 3 zwischen beiden Größen Proportionalität besteht. Man erhält die Konzentration, indem man die Extinktion in einem Photometer bestimmt und mit einem durch Schichtdicke und Art der Substanz gegebenen Faktor multipliziert:

$$c = E \cdot \frac{1}{d \cdot \varepsilon} \qquad (4)$$

Zur Bestimmung der Hämoglobinkonzentration der Blutprobe wird das Hämoglobin durch das in der sogenannten Transformationslösung (Drabkinsche Lösung: 0,5 g Natriumbikarbonat, 100 mg Kaliumferricyanid und 25 mg Kaliumcyanid in 500 ml Aqua dest. gelöst, ACHTUNG: GIFTIG!!!) befindliche Kaliumferricyanid und Kaliumcyanid zu Cyanmethämoglobin = Cyanhämiglobin umgewandelt. Alle im Blut vorhandenen Formen des Hämoglobin (Oxy-, Deoxy-, Met-, CO-Hämoglobin) werden dabei in die Cyanmet-Form gebracht, so dass nur mehr diese eine Form mit definierten spektralen Eigenschaften vorliegt. Mit dem Photometer wird die Extinktion E der Probe bei der Wellenlänge 546 nm gegen einen Vergleichswert der reinen Transformationslösung gemessen. Bei Einsetzen des entsprechenden Extinktionskoeffizienten, Verwendung der Schicht-(= Küvetten-)dicke von 1 cm und Umrechnung auf das gebräuchlichere Konzentrationsmaß g/l lautet dann Gleichung (4)

$$c_{Hämoglobin}\,(g/l) = E \cdot 367 \qquad (5)$$

367 ist der sog. Berechnungsfaktor.

Geräte und Reagenzien

20µl-Kapillare, EDTA-Blut, 5 ml Transformationslösung, Photometer

Durchführung

Eine 20µl-Kapillare wird vollständig und luftblasenfrei mit EDTA-Blut gefüllt und anschließend in das bereits vorbereitete Röhrchen mit 5 ml Transformationslösung gegeben. Dieses Röhrchen wird mit Parafilm verschlossen und so lange über Kopf gemischt, bis sich der Inhalt der Kapillare vollständig in dem Reagenz gelöst hat. Nach 20 Minuten kann der HB photometrisch gemessen werden.

Messung am Photometer

Spektralwellenlänge auf 546 nm einstellen; als Leerwertprobe eine Küvette mit reiner Transformationslösung in den Küvettenhalter einführen und den 0-Wert auf der Photometerskala einstellen. Leerwert-Küvette durch eine Küvette mit der Probelösung ersetzen; Extinktion E ablesen.

Berechnung: Die erhaltenen Extinktionswerte werden in die Gleichung (5) eingesetzt und ergeben die Hämoglobinkonzentration in g pro l.

Gemessene Extinktion:

Hb – Gehalt der Blutprobe:

3.3 Erythrozyten-Zählung

Messprinzip

Die Zahl der Erythrozyten wird pro mm^3 Blut bestimmt: Ein Tropfen einer verdünnten Erythrozytensuspension (Verdünnungsfaktor!) wird in ein genau bekanntes Volumen (Zählkammer mit Deckglas) eingefüllt und die Zellzahl im Mikroskop ausgezählt.

Geräte und Reagenzien

20 µl Kapillare, EDTA-Blut, Mikroskop, Zählkammer nach Thoma bzw. Neubauer mit Deckgläschen,
4 ml Hayemsche Lösung

Durchführung

Zur Herstellung der Erythrozytenverdünnung (1:200) verfährt man genau wie zur Hämoglobinbestimmung. 20 µl EDTA-Blut in die Kapillare durch Kapillarwirkung aufziehen, in die vorgelegten 4 ml Hayemsche Lösung werfen, mit Parafilm verschließen und vorsichtig mischen (**nicht schütteln!**).

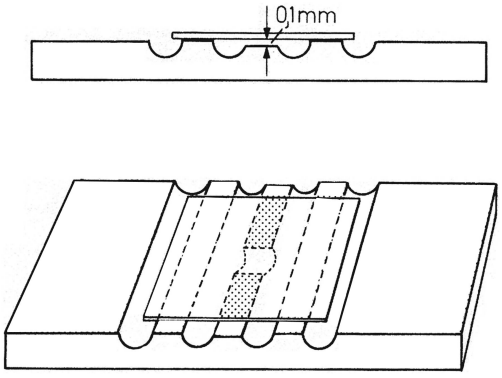


Abb. 3.1: Zählkammer (Thomakammer) für die Erythrozytenzählung

Die verdünnte Erythrozytensuspension wird wie vorne beschrieben hergestellt.

Dann wird die Thomakammer angehaucht und das Deckglas darauf geschoben (Abb. 3.1). Wenn es richtig gemacht wurde, sieht man jetzt die Newtonschen Ringe. Röhrchen noch einmal schwenken. Dann füllt man die Bereiche der Zählkammer unter dem Deckglas, die auf der Skizze gerastert sind (s. Abb. 3.1) mit einem Tropfen der Probe, ohne die gesamte Thomakammer zu fluten, da sich sonst das Deckgläschen löst. Um zu verhindern, dass die Zählkammer während einer Wartephase austrocknet, legt man diese in eine Feuchtekammer (feuchte Petrischale).

Erythrozyten-Zählung: Die Zählkammer wird zuerst bei der 10x -Vergrößerung gesucht und scharf eingestellt. Dann wird mit der 40x-Vergrößerung gezählt. Man zählt **fünf** Gruppenquadrate (5 x 16 Kleinstquadrate) aus, zählt die Zellen zusammen und multipliziert mit Faktor 10.000, um den Erythrozytenwert zu erhalten (s. a. Abb. 3.2). Bei dem Gruppenquadrat werden nur die Zellen mitgezählt, die den inneren L-Rand berühren, d. h. den linken und den unteren Rand. Erythrozyten, die den oberen und rechten Rand berühren, werden bei der Zellzählung nicht berücksichtigt. Auf diese Weise wird vermieden, dass Blutkörperchen doppelt gezählt werden. Verklumpte Blutkörperchen deuten auf Gerinnungsvorgänge oder schlechtes Mischen hin.

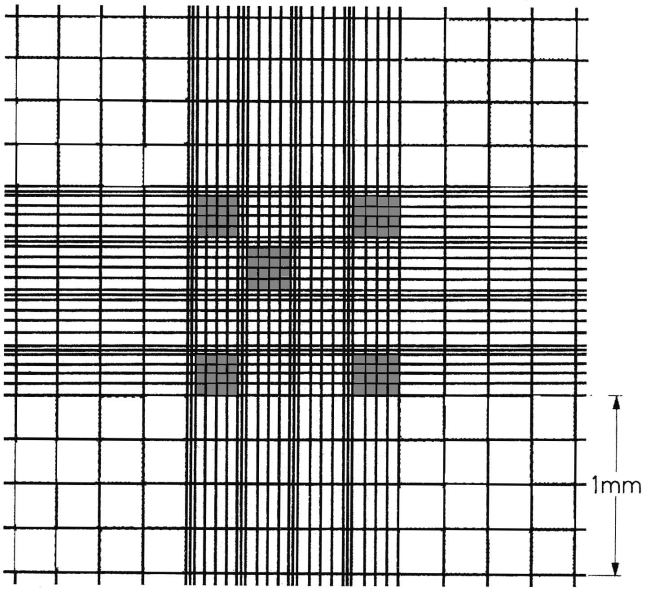


Abb. 3.2: Skizze der Zählkammer mit den zu zählenden Gruppen- und Kleinstquadraten
Entweder 4 Eckquadrate und ein Quadrat aus der Mitte oder diagonal runter 4 Quadrate und ein Quadrat aus der Ecke zählen. Niemals fünf nebeneinander liegende Quadrate, um falsche Werte wegen ungleichmäßiger Verteilung zu vermeiden!

Berechnung

$$Z_E = \frac{X \cdot F}{n \cdot V_K} = \frac{X \cdot 200}{80 \cdot \left(\frac{1}{4000}\right)} \cdot \frac{1}{mm^3} = X \cdot \frac{10.000}{mm^3}$$

Z_E = Erythrozytenzahl
F = Verdünnungsfaktor
n = Zahl der Kleinstquadrate
V_K = Volumen eines Kleinstquadrats
X = gezählte Zahl Erythrozyten in 80 Kleinstquadraten

Die Seitenlänge eines kleinen Quadrates beträgt 1/20 mm, seine Fläche demnach 1/400 mm^2. Die Kammer ist 1/10 mm hoch. Das Volumen über einem kleinen Quadrat beträgt somit 1/4000 mm^3.

3.4 Berechnung einiger abgeleiteter Größen

a) **Mittlere Hämoglobinmenge des einzelnen Erythrozyten**: Die Kenntnis der Erythrozytenzahl und der Hämoglobinkonzentration erlaubt die Berechnung des Hämoglobingehaltes eines einzelnen Erythrozyten. Dieser Gehalt ist unter normalen Bedingungen etwa 30 x 10^{-12} g = 30 pg. Eine Erniedrigung des Hb-Gehaltes der Erythrozyten kennzeichnet die hypochrome Anämie (z. B. Eisenmangelanämie), eine Erhöhung die hyperchrome Anämie (z. B. eine perniziöse Anämie, die bei Vitamin-B12-Mangel auftritt).

Der mittlere Hb-Gehalt eines einzelnen Erythrozyten (**mittleres corpusculäres Hämoglobin = MCH**) wird nach folgender Beziehung aus der Hämoglobinkonzentration und der Erythrozytenzahl im Blut berechnet:

$$\text{Mittlerer Hb-Gehalt des Ery} = \frac{\text{Hb-Menge}}{\text{Blutvolumen}^*} \Big/ \frac{\text{Ery-Zahl}}{\text{Blutvolumen}^*}$$

*Die Größe "Blutvolumen" in den jeweiligen Gleichungen darf für die entsprechenden Berechnungen nur unter der Voraussetzung gekürzt werden, dass ihr Betrag jeweils gleich ist.

Wenn C_{Hb} die Hb-Menge pro Blutvolumen, d. h. die Hb-Konzentration in g/l ist, und Z_E die Erythrozytenzahl pro l ist, so ergibt sich für den mittleren Hb-Gehalt der Erythrozyten

$$\text{MCH (pg)} = \frac{C_{Hb}}{Z_E}$$

Die Angabe von MCH im Protokoll soll in pg (picogramm = 10^{-12} g) erfolgen.

b) **Mittleres Erythrozyteneinzelvolumen**: Anämien gehen oftmals mit Veränderungen des Volumens des einzelnen Erythrozyten einher. Anämien mit vermindertem Erythrozytenvolumen werden mikrozytäre, Anämien mit erhöhtem Erythrozyteneinzelvolumen makrozytäre Anämien genannt. Das mittlere Erythrozytenvolumen (**mittleres corpusculäres Volumen = MCV**) wird aus dem Hämatokrit, der in guter Annäherung den Volumenanteil der Erythrozyten am Blut wiedergibt, und der Erythrozytenzahl pro Blutvolumen berechnet:

$$\text{MCV} = \frac{\text{Erythrozytenvolumen}}{\text{Blutvolumen}^*} \Big/ \frac{\text{Erythrozytenzahl}}{\text{Blutvolumen}^*}$$

$$= \text{Hämatokrit} \Big/ \frac{\text{Erythrozytenzahl}}{\text{Blutvolumen}^*}$$

Mit Hkt für den Hämatokritwert und Z_E für die Erythrozytenzahl pro l ergibt sich das mittlere Erythrozytenvolumen

$$\text{MCV (fl)} = \frac{\text{Hkt}}{Z_E}$$

Das MCV wird in Femtoliter (1 fl = 10^{-15} l) oder μm^3 angegeben.

Mittlere Hämoglobinkonzentration in den Erythrozyten

Die mittlere Hämoglobinkonzentration in Erythrozyten (MCHC) lässt sich aus der Hämoglobinkonzentration des Blutes und dem Hämatokritwert bestimmen:

$$MCHC = \frac{\text{Hb-Menge}}{\text{Blutvolumen}^*} \Big/ \frac{\text{Ery-Volumen}}{\text{Blutvolumen}^*}$$

$$= \frac{\text{Hämoglobinkonzentration}}{\text{Hkt}}$$

Rotes Blutbild

Erythrozytenzahl:	Z_E =	/µl
Hämatokrit	Hkt =	
Hämoglobinkonzentration	[Hb] =	g/l
Mittleres corpuskuläres Hämoglobin (MCH)	MCH =	pg
Mittleres celluläres Volumen des Erythrozyten (MCV)	MCV =	fl oder μm^3
Mittlere corpuskuläre Hämoglobin-Konzentration des Erythrozyten (MCHC)	MCHC =	g/l

Normalwerte: (in Klammern der 95%-Wert)

Erwachsene	Frauen		Männer	
Hämoglobinkonzentration (g/l)	140	(115 - 160)	160	(140 - 180)
Hämatokrit	0,42	(0,37 – 0,47)	0,47	(0,40 – 0,54)
Erythrozytenzahl (10^{12}/l)	4,8	(4,2 - 5,4)	5,4	(4,6 - 6,2)
Mittlere Hb-Menge eines Erythrozyten (MCH) (pg)	31	(26 - 35)	29	(26 - 32)
Mittleres Volumen eines Erythrozyten (MCV) (fl oder μm^3)	95	(80 - 120)	88	(80 - 96)
Mittlere Hb-Konzentration der Erys (MCHC) (g/l)	340	(300 - 360)	340	(310 - 350)

4. Osmotische Resistenz

Materialien

- Blutprobe in einer EDTA-Monovette, 15 Kunststoffröhrchen, 4 x Glas-Pipetten 2ml, Kunststoffpasteurpipette, 15 x Parafilm, Ständer für die Röhrchen, wasserfester Faserschreiber
- NaCl-Lösungen mit Konzentrationen von 0,2 % - 0,9 % NaCl/Liter
- Harnstofflösung isoton (300 mosm)
- A. bidest
- Seifenlösung (Saponin in 0,9 % NaCl)

Osmotische Resistenz - Verdünnungsreihe

0,90 % = 90 ml 1 % NaCl + 10 ml A. bidest
0,80 % = 80 ml 1 % NaCl + 20 ml A. bidest
0,70 % = 70 ml 1 % NaCl + 30 ml A. bidest
0,60 % = 60 ml 1 % NaCl + 40 ml A. bidest
0,55 % = 55 ml 1 % NaCl + 45 ml A. bidest
0,50 % = 50 ml 1 % NaCl + 50 ml A. bidest

0,45 % = 45 ml 1 % NaCl + 55 ml A. bidest
0,40 % = 40 ml 1 % NaCl + 60 ml A. bidest
0,35 % = 35 ml 1 % NaCl + 65 ml A. bidest
0,30 % = 30 ml 1 % NaCl + 70 ml A. bidest
0,25 % = 25 ml 1 % NaCl + 75 ml A. bidest
0,20 % = 20 ml 1 % NaCl + 80 ml A. bidest

Durchführung

Röhrchen beschriften und mit je 2 ml der NaCl-Lösung (NaCl 0,2 % bis 0,9 %) vorlegen (Glaspipette). Einen Tropfen der gut gemischten Blutprobe hineinpipettieren (Kunststoffpasteurpipette), Röhrchen mit Parafilm verschließen und über Kopf schwenken (nicht schütteln, um mechanische Hämolyse zu vermeiden!); 10 Minuten stehen lassen; danach 10 Minuten zentrifugieren bei 3000 rpm.

Auswertung

Keine Hämolyse: Auf dem Boden des Reagenzglases liegen intakte Erythrozyten, der Überstand ist farblos.

Vollständige Hämolyse: Klare, rote Lösung ohne intakte Erythrozyten (**auf den Bodensatz achten!!**)

Definition:

minimale osmot. Resistenz = die NaCl-Konzentration, bei der sich erstmals der Überstand rötlich färbt.

maximale osmot. Resistenz = die NaCl-Konzentration, bei der die Erythrozyten komplett hämolysiert sind, also nach Zentrifugation keine intakten Erythrozyten am Boden zu finden sind.

Osmotische Resistenz

Testlösung	Hämolyse? (keine – teilweise – vollständige)	Erklärung (kurz)
Harnstofflösung isoton (300 mosm)		
Aqua bidest		
Seifenlösung (Saponin in 0,9 % NaCl)		

	Hämolyse	minimale und maximale osmotische Resistenz angeben
NaCl 0,90 %		
NaCl 0,80 %		
NaCl 0,70 %		
NaCl 0,60 %		
NaCl 0,55 %		
NaCl 0,50 %		
NaCl 0,45 %		
NaCl 0,40 %		
NaCl 0,35 %		
NaCl 0,30 %		
NaCl 0,25 %		
NaCl 0,20 %		

5. Blutgruppenbestimmung

Die Blutgruppeneigenschaften auf der Oberfläche der Erythrozyten sind genetisch determiniert und bestehen im AB0-System aus Kohlehydratkomponenten von Glykolipiden der Erythrozytenmembran oder im Rhesussystem aus Proteinen. Die Bestimmung der Blutgruppen ist notwendig, um bei einer Transfusion Blutgruppenverträglichkeit sicherstellen zu können. Bei Unverträglichkeit (Agglutination – Antigen-Antikörperreaktion) kann es zu Transfusionszwischenfällen mit lebensbedrohlichen Folgen kommen.

Durchführung

Das AB0-System

a) Bestimmung antigener Merkmale der Erythrozytenmembran

Herstellung der Proben: Blutprobe 30 min bei 3000 rpm zentrifugieren; Serum in beschriftete Zweitröhrchen abpipettieren und die Erythrozyten (Blutkuchen) mit der Pasteurpipette durch Aufziehen mit dem Restserum verdünnen. In die nebeneinander liegenden Vertiefungen der Testplatte werden je 2 Tropfen Testserum Anti-A (blau), Anti-B (gelb) und Anti-AB (farblos) pipettiert. Zu jedem Testserum wird anschließend 1 Tropfen einer Blutprobe zugegeben. Der Testansatz bzw. die Testplatte wird leicht geschwenkt.

Haben die Erythrozyten der zu untersuchenden Probe die antigene Eigenschaft A, B oder A+B, so tritt wenige Minuten nach Zugabe zum entsprechenden Testserum eine makroskopisch sichtbare Agglutination auf.

b) Nachweis der Blutgruppenantikörper Anti-A und Anti-B mit bekannten Testerythrozyten

Viermal wird je 1 Tropfen Probandenserum in die Vertiefungen der Testplatte pipettiert. Je 1 Tropfen der Testerythrozyten wird dazugegeben; Testplatte schwenken (s. o.). Die Ergebnisse der Bestimmungen in a) und b) sind auf Seite 3.9 einzutragen und danach die Blutgruppe des Probanden zu bestimmen.

Fehlermöglichkeiten: "Geldrollenbildung" kann Agglutination vortäuschen, bakterielle Verunreinigung der Blutprobe kann zu unspezifischen Reaktionen führen (Panagglutination); Gerinnung kann bei der Verwendung von Vollblut aus Fingerbeere oder Ohrläppchen eine Agglutination vortäuschen.

c) Eigenkontrolle: Serum und Erythrozyten des eigenen Blutes (Nachweis von Kälteantikörper, Autoantikörper etc.)

Das Rhesus-System

Prinzip der Bestimmung des Rhesusfaktors D

Erythrozyten des zu prüfenden Blutes werden mit einem Testserum vermischt, das Anti-D Antikörper enthält. Die Anwesenheit des Rhesusfaktors D wird durch auftretende Agglutination erkannt. Werden Anti-D IgG-Antikörper verwendet, so kann der Zusatz von Coombs-Serum zum Auslösen einer Agglutination erforderlich sein, da es sich um inkomplette Antikörper handelt. Anti-D IgM Antikörper können Rh-positive Erythrozyten direkt agglutinieren.

Durchführung

Zunächst wird 1 Tropfen Anti-D Testserum auf die Testplatte gebracht und 1 Tropfen des zu untersuchenden Blutes zugefügt. Durch leichtes Rotieren der Testplatte wird die Agglutination sichtbar.

Kreuzprobe

Bei der Kreuzprobe wird geprüft, ob das Serum des Empfängers Antikörper gegen die Erythrozyten eines Spenders enthält (Major-Test). Im zweiten Teil des Testes wird geprüft, ob das Serum des Spenders Antikörper gegen die Erythrozyten des Empfängers enthält (Minor-Test). Einem Patienten darf das Blut ausschließlich nach negativer Kreuzprobe infundiert werden.

Bedside-Test

Um unmittelbar vor Beginn einer Transfusion eine Blutgruppenunverträglichkeit auszuschließen, wird der Bedside-Test durchgeführt, den Sie im Praktikum statt der Kreuzprobe durchführen. Dafür erhalten Sie im Praktikum entsprechende Karten und eine mündliche Anweisung zur Durchführung des Tests (Demonstration, einmal pro Gruppe).

BEFUND	**Testserum**			
	Anti-A	Anti-B	Anti-A + Anti-B	Anti-D
Erythrozyten				

BEFUND	**Testerythrozyten** der Blutgruppe				
	A	B	A_1	A_2	0
Serum					

eigene Blutgruppe	**Serum**
Erythrozyten	

Blutgruppenbestimmung

AB0-System:

Rh-Faktor:

6. Direkter und indirekter Coombs-Test

Der Coombs-Test ist ein Antikörper-Suchtest, der entweder freie oder an Erythrozyten gebundene Antikörper nachweist und bei der Vorbereitung von Transfusionen (Kreuzprobe), beim Screening nach Antikörpern im Blutplasma von schwangeren Frauen und bei der Detektion von immunologischen hämolytischen Anämien angewendet wird.

Beide Tests, direkter wie indirekter, basieren auf dem Prinzip der anti-humanen Antikörper (Antiglobuline = Coombs-Serum), die in der Lage sind, humane Antikörper auf Erythrozyten und freie, im Serum vorhandene Antikörper (vor allem IgG oder IgM, selten IgA) zu detektieren.

Direkter Coombs-Test

Wenn Autoantikörper gebildet wurden, sind Erythrozyten mit Immunglobulin beladen. Bei Vortransfusionen und bei Neugeborenen können die Erythrozyten auch mit Allo-Antikörpern beladen sein. Mit einem Antiglobulin kann man diese in vivo-Beladung mit Immunoglobin und/oder Komplementfaktoren nachweisen.

3 – Stufen – Antikörper – Suchtest

1. Stufe: NaCl - Technik

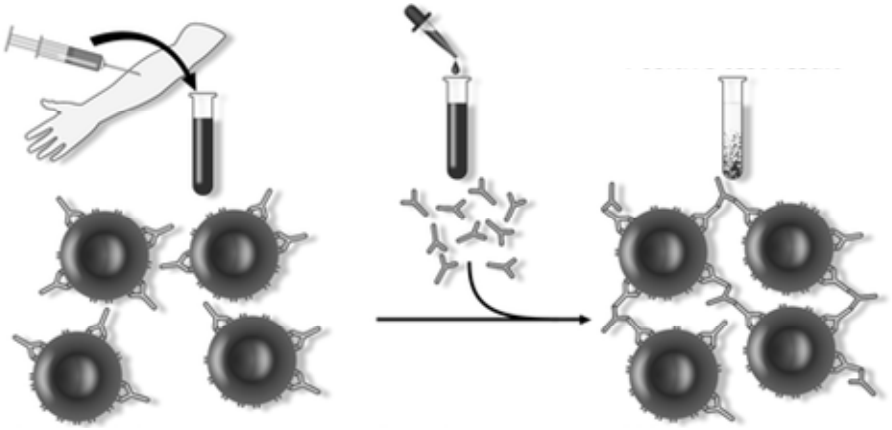
1 Tropfen einer 3%igen Erythrozytensuspension (Spendererythrozyten) werden mit 2 Tropfen Empfängerserum versetzt, inkubiert, zentrifugiert und vorsichtig aufgeschüttelt und auf Agglutination überprüft. Diese Technik ist wenig sensitiv für IgG-Antikörper und weist überwiegend IgM-Antikörper nach. Einige der wichtigsten Allo–Antikörper sind mit dieser Technik **nicht** nachweisbar.

2. Stufe: LISS - Technik

Es gibt viele verschiedene Verstärkertechniken: LISS, Albumin, Enzym und Coombs–Serum sowie Kombinationen dieser Methoden. In der 2. Stufe wird ein LISS-Ansatz durchgeführt. Dazu wird der Ansatz aus der 1. Stufe mit 2 Tropfen LISS-Medium versetzt, inkubiert, zentrifugiert und aufgeschüttelt.

Prinzip: Antigen-Antikörper-Reaktionen werden in Lösungen mit niedriger Ionenstärke (LISS = Low Ionic Strength Solution) erheblich beschleunigt. Im Vergleich zum NaCl-Test erfolgt die Antikörper-Bindung innerhalb kürzerer Zeit, und manche klinisch relevanten Allo-Antikörper vom IgG-Typ können nachgewiesen werden, die im NaCl-Test keine Agglutination verursachen.

Direkter Coombs-Test



Blut eines Patienten mit hämolytischer Anämie: Antikörperbindung auf der Oberfläche der Erythrozyten

Erythrozyten des Patienten werden mit anti-human Antikörpern (Coombs-Serum) inkubiert

Erythrozytenagglutination: Antikörper aus Coombs-Serum verbinden die Erythrozyten, indem sie an die Autoantikörper binden

6.1 Direkter Coombs-Test - Durchführung

Material: - Coombsserum (AHG = Anti-Human-Globulin)
- 3-5%ige Erythrozyten-Suspension

Herstellung der Erythrozyten – Suspension

1) Zu den abzentrifugierten Erythrozyten **3 ml 0,9%ige NaCl**-Lösung pipettieren
2) mit einer Pasteurpipette die Erys gut aufmischen
3) 3 min bei 2000 Upm zentrifugieren
4) Überstand abkippen
5) diesen Waschschritt noch **2 mal** wiederholen
6) Erys anschließend in einer **3 ml 0,9%igen NaCl** – Lsg aufmischen
7) **3ml 0,9%ige NaCl** in einem separaten Röhrchen vorlegen und ca. **3 Tropfen** der **Erys** dazugeben = **3 - 5%ige Erythrozyten-Suspension**

Testansatz

1) **300 µl Erythrozyten-Suspension** in ein Röhrchen pipettieren
2) bitte nur **1 Tropfen!!! Coombs-Serum** dazugeben
3) 1 min bei 2500 Upm zentrifugieren

durch leichtes Schwenken ablesen, ob sich **Agglutinate** gebildet haben

Indirekter Coombs-Test

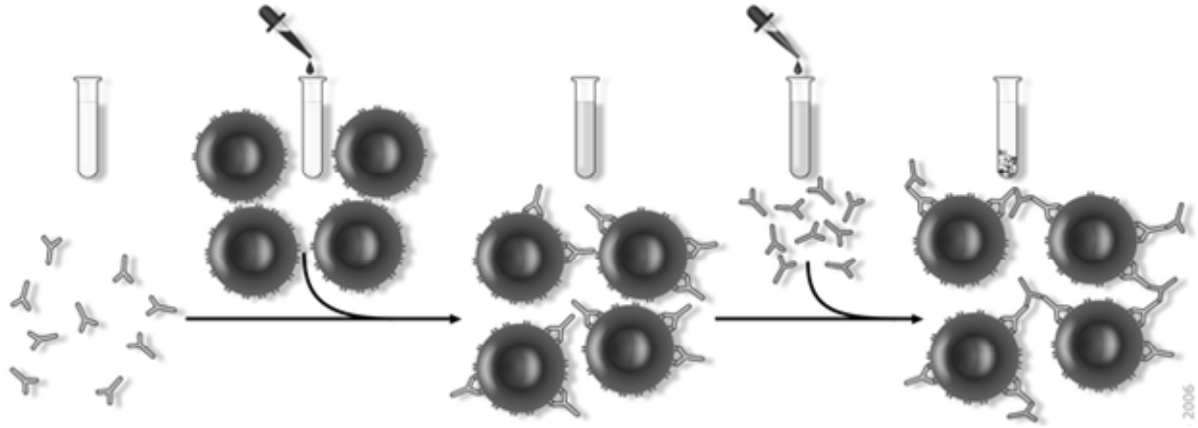
3. Stufe: Antiglobulin - Technik

Der **indirekte Coombs-Test** ist in Kombination mit LISS oder Albumin die Verstärkertechnik, die die höchste Sensitivität für Allo-Antikörper aufweist. Deshalb ist dieser Test für die Kreuzprobe vorgeschrieben.

Der Ansatz aus der 2. Stufe wird dreimal gewaschen. Dabei bleiben spezifische Allo-Antikörper an den Erythrozyten gebunden, freies Immunglobulin wird aber entfernt. Anschließend wird Coombsserum zugegeben. Der Ansatz wird zentrifugiert und aufgeschüttelt.

Das Coombs-Serum vernetzt die an Erythrozyten gebundenen Allo-Antikörper untereinander und bewirkt dadurch eine Agglutination. Waren keine Antikörper an die Erythrozyten gebunden, bleibt die Reaktion negativ.

Indirekter Coombs-Test


Empfänger-serum, das Antikörper enthält
Zugabe von Spenderblut
Empfänger-Antikörper binden an Erythrozyten des Spenderbluts
Zugabe von anti-human Antikörpern (Coombs-Serum)
Erythrozytenagglutination durch Bindung der IgG-Antikörper aus dem Coombs-Serum

6.2 Indirekter Coombs-Test – Durchführung

Major Test: Spendererythrozyten + Empfängerserum
Minor Test: Spenderserum + Empfängererythrozyten

Material:
- auf Antikörper zu untersuchendes Serum
- 3-5%ige Erythrozytensuspension (siehe direkter Coombs-Test)
- Enlisst II (Low Ionic Strength Solution)
- 0,9%ige NaCl-Lösung
- Coombsserum (AHG =Anti-Human-Globulin)

Testansätze

1) 2 Röhrchen mit **(1)** und **(2)** beschriften
2) in jedes **0,5 ml** einer **0,9%igen NaCl**-Lösung pipettieren
3) nur in Röhrchen **(1)** 0,5 ml des **Serums!!** pipettieren, in beide Röhrchen **0,5 ml** einer **3-5%igen Erythrozyten-Suspension** und **2 Tropfen!! Enlisst II** geben
4) 10 – 15 min bei 37° C im Wasserbad inkubieren
5) 1 min bei 2500 Upm zentrifugieren
6) Zellen auf Hämolyse und Agglutination beurteilen
7) In jedes Röhrchen **5 ml 0,9%ige NaCl**–Lösung pipettieren
8) 2 min bei 2500 Upm zentrifugieren
9) Überstand vorsichtig abpipettieren
10) diesen **Waschschritt** noch **2 mal** wiederholen
11) in beide Röhrchen **2 Tropfen!! Coombs-Serum** geben und mischen
12) 1 min bei 2500 Upm zentrifugieren
13) Zellen auf Agglutination überprüfen

7. Die Blutungszeit und Gerinnungszeit

7.1 Blutungszeit (subaqual)

Die Dauer einer Blutung aus einer kleinen stichförmigen Wunde wird als Blutungszeit bezeichnet und dient der Prüfung der primären Hämostase.

Geräte und Reagenzien zur Bestimmung der Blutungszeit: Einmallanzetten, Tupfer, Alkohol, Becherglas mit steriler Kochsalzlösung (37° C), Stoppuhr.

Durchführung

Mit einer Lanzette wird etwa 4 mm tief in die Fingerbeere gestochen und gleichzeitig eine Stoppuhr gestartet. Die Fingerbeere wird in ein mit steriler physiologischer Kochsalzlösung gefülltes Glas getaucht. Es lässt sich beobachten, dass das Blut als dünner Faden in der Kochsalzlösung absinkt. Wenn der Blutfaden abreißt, wird die Stoppuhr angehalten und die Blutungszeit abgelesen.

Anmerkung: Die Blutungszeit wird von der Einstichtiefe und der Hauttemperatur beeinflusst.

Normwert: 1,5 – 5 min

Blutungszeit:

Blutfaden abgerissen nach: min

7.2 Gerinnungszeit

Mit diesem vereinfachten Test lässt sich überprüfen, ob die Faktoren des endogenen Gerinnungssystems eine normale Fibrinbildung ermöglichen.

Aus der Einstichstelle in der Fingerbeere werden 2 – 3 Tropfen Kapillarblut entnommen und auf ein Uhrglas gegeben (Handschuhe anziehen!). Zum Zeitpunkt der Blutentnahme wird eine Stoppuhr gestartet. Mit der Lanzette wird etwa alle 10 Sekunden durch die Probe gefahren und geprüft, ob ein Fibrinfaden hängen bleibt (genau hinsehen, Fibrinfaden ist sehr fein!). Der Zeitraum von der Blutentnahme bis zur Entstehung eines Fibrinfadens heißt Gerinnungszeit.

Der Normwert der Gerinnungszeit beträgt bei Anwendung dieser Methode ca. 2 – 4 Minuten.

Gerinnungszeit:

Fibrinfaden nach: min

8. Quick-Test

Der Quick-Test dient als Suchtest für Gerinnungsstörungen im exogenen Gerinnungsweg einschließlich gemeinsamer Endstrecke, insbesondere der Überprüfung der Gerinnungsfaktoren II (Prothrombin), V, VII und X.

Materialien: Blutprobe in der grünen Citrat-Monovette, Normal-Plasma, Abnormal-Plasma, Verdünnungspuffer, Ca^{2+}-Thromboplastin, Glasröhrchen, Ständer für die Röhrchen, wasserfester Faserschreiber Wasserbad (37° C), Häkchen

Durchführung

Zuerst wird eine Verdünnungsreihe aus Normal-Plasma und Verdünnungspuffer hergestellt (Normal-Plasma + 4 Verdünnungsstufen entsprechend dem beiliegenden Schema).

Danach wird die **Thromboplastinzeit** (auch Prothrombinzeit genannt) wie folgt ermittelt:

Jeder Probe (0,1 ml) werden bei 37° C im Wasserbad 0,2 ml Ca^{2+}-Thromboplastin zugesetzt. Mit einem Häkchen wird anschließend kontrolliert, in welcher Zeit sich erste Fibrinfäden bilden (= Thromboplastinzeit, TPZ). Die so ermittelte TPZ beträgt normalerweise 11 - 16 sec.

Über die Zuordnung der Plasma-Verdünnungsstufe, angegeben als Quick-Werte (unverdünntes Normal-Plasma: Quick-Wert = 100 %, Normal-Plasma 1:1 verdünnt mit Verdünnungspuffer: Quick-Wert = 50 % usw.), zur gemessenen Thromboplastinzeit lässt sich eine Eichgerade ermitteln.

Es wird nun die Thromboplastinzeit des unverdünnten Plasmas von zwei Probanden, eines Normal-Plasmas und eines Abnormal-Plasmas, untersucht (gleicher Testansatz wie oben). Aus der gemessenen TPZ lässt sich über die Eichgerade der zugehörige Quick-Wert bestimmen.

Normbereich des Quick-Wertes ca. 70 bis 120 %.

Der Quick-Wert wird in der Klinik zur regelmäßigen Kontrolle der Therapie mit oralen Antikoagulantien, Vitamin-K-Antagonisten (Cumarin-Derivaten), verwendet. So sollte z.B. der Quick-Wert bei Patienten mit einer Arrhythmia absoluta aufgrund von Vorhofflimmern bei 30 % liegen.

Zur Standardisierung wurde die International Normalized Ratio (INR) eingeführt, bei der das verwendete Thromboplastin gegen das Referenzthromboplastin der WHO abgeglichen wird.

Die INR verhält sich zum Quickwert umgekehrt proportional und lässt sich wie folgt aus der Thromboplastinzeit errechnen:

$$INR = \left(\frac{TPZ_{Patient}}{TPZ_{normal}} \right)^{ISI}$$

TPZ Patient: Thromboplastinzeit des Patientenplasmas

TPZ normal: Thromboplastinzeit von Normalplasma

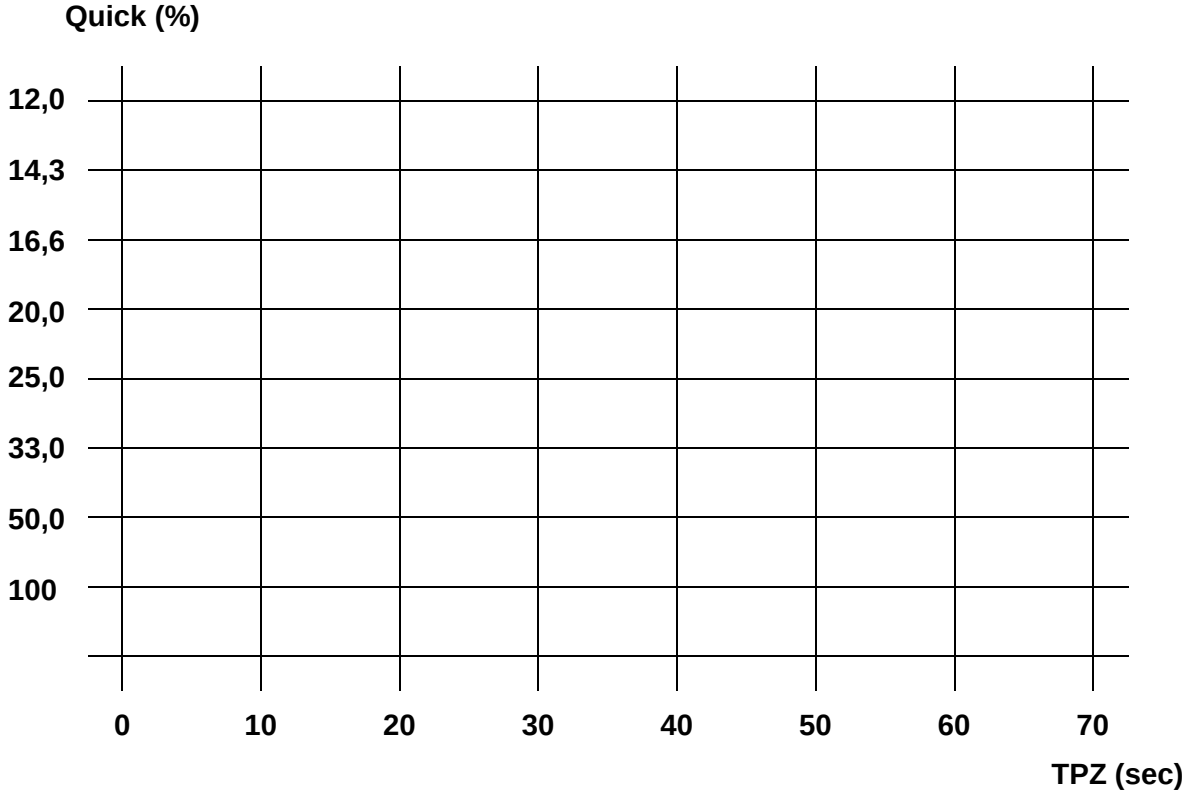
ISI: Internationaler Sensitivitätsindex (ist für das Thromboplastin des Herstellers im Vergleich zum Referenzthromboplastin festgelegt und liegt in der Regel zwischen 1,0 und 1,4).

Der Normalwert der INR liegt bei 1,0. Bei Patienten mit einer Arrhythmia absoluta aufgrund von Vorhofflimmern sollte ein INR-Wert von 2,0 bis 3,0 angestrebt werden.

Testansatz: 0,1 ml Citratplasma + 0,2 ml Ca^{2+}-Thromboplastin

Plasmaverdünnung	Quick (%)	TPZ (sec)
1:1 (=1+0)	100	
1:2 (=1+1)	50	
1:3 (=1+2)	33	
1:4 (=1+3)	25	
1:8 (=1+7)	12	

Eichgerade:



Proben	TPZ (sec)	Quick-Wert (%)
Proband 1		
Proband 2		
Normal-Plasma		
Abnormal-Plasma		

9. Bestimmung der partiellen Thromboplastinzeit

Mit der Bestimmung der **partiellen Thromboplastinzeit (PTT)** (auch aktivierte PTT genannt) wird ein Gruppentest für die Faktoren des endogenen Gerinnungsweges (einschließlich gemeinsamer Endstrecke) durchgeführt (Gerinnungsfaktoren XII, XI, IX, VIII, X, V, II, I).

Materialien: Blutprobe in einer grünen Citrat-Monovette, Normal-Plasma, Abnormal-Plasma, PTT-Reagenz, $CaCl_2$-Lösung, Glasröhrchen, Ständer für die Röhrchen, wasserfester Faserschreiber, Wasserbad (37° C), Häkchen

Durchführung

Bei 37° C (Wasserbad) werden 0,1 ml Citrat-Plasma-Probe und 0,1 ml PTT-Reagenz (20–25° C) gemischt und für genau 3 min inkubiert. Dann wird 0,1 ml $CaCl_2$-Lösung (vorgewärmt bei 37° C) zugesetzt. Mit dem Häkchen wird kontrolliert, in welcher Zeit sich erste Fibrinfäden bilden. Normwerte liegen bei 30 – 50 sec.

Das PTT-Reagenz enthält einen Aktivator des Gerinnungsfaktors XII (Kaolin, führt zur Oberflächenaktivierung, man spricht daher auch von aktivierter PTT) sowie ein Phospholipid (Kephalin, ersetzt den Plättchenfaktor 3, daher der Name partielle Thromboplastinzeit im Unterschied zur Thromboplastinzeit des Quick-Tests).

Bei einer Heparin Therapie ist die PTT auf das 1,5 – 3-fache der Norm verlängert.

Um zu differenzieren, ob eine verlängerte PTT auf die Behandlung eines Patienten mit Heparin zurückzuführen ist oder z. B. Folge einer Hämophilie ist, kann der Test unter Zusatz von Protamin (Heparin-Antidot) durchgeführt werden. Wird unter diesen Bedingungen eine verlängerte Gerinnungszeit in den Normalbereich zurückgeführt, ist Heparin als Ursache für die Verlängerung anzusehen.

Proben	PTT (sec)
Proband 1	
Normal-Plasma	
Abnormal-Plasma	

ATMUNG UND ENERGIEHAUSHALT

GK 5 und 8.1

Lehrbücher: Deetjen / Speckmann / Hescheler, 5. Aufl., Kap. 9; Kap. 11; Kap. 14
Klinke / Pape / Kurtz / Silbernagl, 6. Aufl., Kap. 8; Kap. 16
Schmidt / Lang, 30. Aufl., Kap. 32-34; Kap. 36; Kap 40
Steinhausen / Gulbins, 5. Aufl., Kap. 4; Kap. 5; Kap. 7

Wichtige Lernziele: Gastransport im Blut, Blutpufferung, Gasaustausch, Zellatmung, Atemantriebsgrößen, Lungenfunktion, Einblick in klinisch relevante Parameter wie Einsekundenkapazität, Vitalkapazität, inspiratorisches und exspiratorisches Reservevolumen, respiratorischer Quotient, indirekte Kalorimetrie, Wirkungsgrad.

Fallbeispiele:

1. Eine junge Frau leidet seit etwa einer Woche an einer Virusinfektion. Sie hat Gliederschmerzen, katarrhalische Erscheinungen und eine leicht erhöhte Temperatur (37,5° C). Neben ihrem allgemein schlappen Befinden bemerkt sie bald ein Kribbeln in den Beinen und einen unsicheren Gang. Die neurologische Untersuchung ergibt eine beinbetonte Tetraparese, fehlende Muskelreflexe sowie Hypästhesien an Fingern und Zehen. Abgesehen von einer Tachykardie (etwa 120 Schläge/min) ist die internistische Untersuchung unauffällig. Am späten Abend entwickelt sich jedoch ein dramatischer Kräfteverfall, begleitet von heftigen Hustenattacken. Eine schwere Atemnot stellt sich ein, schließlich wird die Atmung insuffizient. Die Blutgasanalyse ergibt eine deutliche Hypoxie und Hyperkapnie (hyperkapnisches Versagen). Als ihre Vitalkapazität unter 15 ml/kg Körpergewicht abgenommen hat, wird eine künstliche Beatmung der Patientin vorgenommen. Erst im Laufe der folgenden Wochen bildete sich die Symptomatik zurück.
   Diagnose: Durch eine seltene postinfektiöse Polyradikuloneuritis (Nervenentzündung) kam es im fortgeschrittenem Stadium zu neuromuskulären Funktionsausfällen. Die dadurch u. a. mangelhafte Innervierung der Atemmuskulatur bedingte eine Ventilationsstörung gefolgt von einer Erhöhung des CO_2-Partialdrucks. Die übliche Rückkopplung dieser Größe auf die Atmung war dementsprechend wirkungslos.

2. Ein junger Mann erleidet nachts einen Anfall akuter Atemnot. Heftig pfeifende exspiratorische Atemgeräusche, eine Atemfrequenz von 28/min, eine verlängerte Ausatmungsphase (trotz Einsatz seiner Atemhilfsmuskulatur, das Abdomen ist angespannt) und heftige Geräusche über der gesamten Lunge fallen sofort auf. Pulsfrequenz (112/min) und Blutdruck sind erhöht (150/90). Im EKG finden sich Anzeichen für eine Rechtsherzhypertrophie („Cor pulmonale“). Das Zwerchfell zeigt einen maximalen Tiefstand (Röntgenübersichtsaufnahme des Thorax). Im Sputum werden vermehrt eosinophile Granulozyten gefunden. Die Blutgasanalyse ergibt trotz scheinbarer Hyperventilation einen P_{O_2} von 56 mmHg.
   Diagnose: Die geschilderten Beschwerden sind typisch für ein Asthma bronchiale. Kennzeichen eines asthmatischen Anfalls sind: Atemfrequenz > 24/min, exspiratorischer Stridor, Giemen und Brummen über der Lunge, Herzfrequenz > 100/min, Tiffeneau-Test < 70 % des Normwerts (siehe Praktikum), P_{O_2} bei Hyperventilation erniedrigt.

   Allgemeine Therapiestrategien: Schadstoffreduktion, Vermeidung allergener oder reizender Stoffe in der Inhalationsluft (bei allergischer Entstehung). Beim Anfall sind β-Sympathomimetika (zur Dilatation

der Bronchien) als Aerosol oder i.v. nützlich; Glukokortikoide können zur Entzündungshemmung in den Atemwegen eingesetzt werden.

Abkürzungen in der Atemphysiologie

Herkömmliche Bezeichnung (Internationale Bezeichnung, angewandt im Oxycon α)

$F_{CO_2,A}$	fraktionelle alveoläre CO_2-Konzentration
$FETCO_2$	fraktionelle endexspiratorische (ET = engl. endtidal) CO_2-Konzentration
$F_{O_2,A}$	fraktionelle alveoläre O_2-Konzentration
$FETO_2$	fraktionelle endexspiratorische O_2-Konzentration
$F_{CO_2,E}$ (FCO_2)	fraktionelle exspiratorische CO_2-Konzentration
$F_{O_2,E}$ (FO_2)	fraktionelle exspiratorische O_2-Konzentration
$F_{CO_2,I}$ ($FITCO_2$)	fraktionelle inspiratorische CO_2-Konzentration
$F_{O_2,I}$ ($FITO_2$)	fraktionelle inspiratorische O_2-Konzentration
P_{CO_2} (PCO_2)	CO_2-Partialdruck
P_{O_2} (PO_2)	O_2-Partialdruck
P_B (PB)	Barometerdruck
$P_{CO_2,A}$	alveolärer CO_2-Partialdruck
$P_{O_2,A}$	alveolärer CO_2-Partialdruck
f (BF)	Atemfrequenz (min^{-1}), "breathing frequency"
V_T (VT)	Atemzugvolumen, "tidal volume"
V_A (VA)	alveolärer Anteil des Atemzugvolumens
V_D (VD)	Totraumvolumen, "dead space"
$\dot{V}_E$ (VE)	Ventilation in l/min (Atemminutenvolumen, bestimmt aus dem exspiratorischen Anteil ($\dot{V}$ ist nahezu = $\dot{V}_E$)
$\dot{V}_A$	alveoläre Ventilation in l/min
$\dot{V}_D$	Totraumventilation in l/min
$\dot{V}_{O_2}$ (VO_2)	O_2-Aufnahme
$\dot{V}_{CO_2}$ (VCO_2)	CO_2-Abgabe
AZQ	Atemzeitquotient: Verhältnis von Inspirations- zu Exspirationsdauer
RQ (RER)	Respiratorischer Quotient, "respiratory ratio"
EQO_2	Atemäquivalent für O_2: $\dot{V}_E / \dot{V}_{O_2}$
VC	Vitalkapazität
ERV	Exspiratorisches Reservevolumen
TLC	Totale Lungenkapazität
FEV1	forciertes exspiratorisches Volumen in 1 Sekunde.
FEV1%VCIN	forciertes exspiratorisches Volumen in 1 Sekunde in % der VC
ATPS	ambient temperature, pressure saturated (Index)
BTPS	body temperature, pressure saturated (Index)
STPD	standard temperature, pressure 760 mmHg, dry (Index)

PRAKTIKUMSVERSUCHE

Die Versuchsblöcke 1 - 3 und 4 - 5 werden zeitgleich von jeweils 5 Studenten bearbeitet. Für die Auswertungen und das Einkleben der Registrierungen steht das Skript als Protokollheft zur Verfügung. Einige Fotokopien, die im Praktikum angefertigt werden, sollten farbig markiert werden. Bitte bringen Sie daher Schere, Klebstoff und dünne farbige Filzstifte mit!

1. Atemstrom, Atemzugvolumen, O_2- und CO_2-Gehalt der Exspirationsluft

Zielsetzung

Beschreiben Sie zunächst den Atemstrom und bestimmen Sie das Atemzugvolumen (V_T), die Atemfrequenz (f) und den Atemzeitquotienten (AZQ: Inspirationsdauer geteilt durch Exspirationsdauer). Ordnen Sie die Veränderungen der exspiratorischen CO_2- und O_2-Konzentrationen den Atemphasen zu. Wie verhalten sich endexspiratorische CO_2- und O_2-Konzentrationen bei Hypo- und Hyperventilation? Beobachten Sie, wie sich diese Größen bei einer Hyperkapnie verändern, die im Praktikum durch eine Totraumvergrößerung herbeigeführt wird.

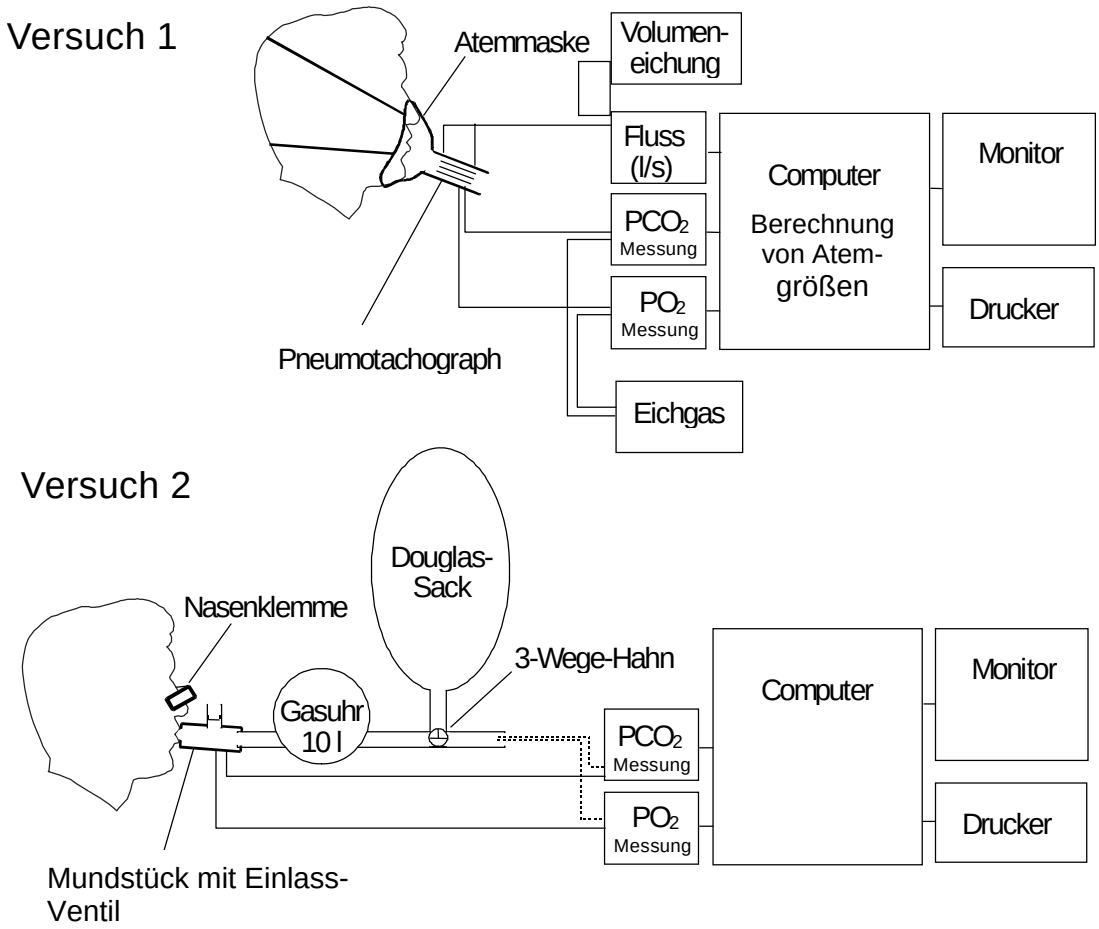


Abb. 4.1 Versuchsaufbau für Versuch 1 und 2

Versuchsanordnung

Machen Sie sich mit dem Versuchsaufbau für den ersten Versuchsteil anhand der Abb. 4.1 vertraut.

Versuchsdurchführung

Zunächst ist eine **Eichung der O_2-, CO_2- und Volumen-Messgeräte** zusammen mit dem Kurspersonal durchzuführen. Vor jedem der folgenden Versuche muss die Betriebsbereitschaft des Oxycon α abgewartet werden (grüne Anzeige).

Versuchsablauf

Die Versuchsperson fixiert eine Atemmaske mit Pneumotachograph vor dem Gesicht und sitzt entspannt, ohne auf die Registrierung zu blicken. Die Versuche 1 a-c werden von einer zweiten Person betreut. Die Dauer des gesamten Versuchs beträgt **etwa 10 min**. Die Aufzeichnung erfolgt mit dem Oxycon α (Programmteil „Beginn").

a) Ruheatmung

Die Versuchsperson atmet ruhig bei laufender Registrierung für 2 - 3 min, bis sich gleich bleibende endexspiratorische Gaskonzentrationen einstellen. Es soll versucht werden, das endexspiratorische O_2- und CO_2-Plateau darzustellen. Eine geeignete Registrierung, die den Verlauf der Gaskonzentrationen, des Atemstroms und des Atemvolumens zeigt, soll ins Skript eingeklebt und ausgewertet werden (Abkürzungen siehe Seite 4.2).

b) Hyperkapnie bei Rückatmung

Die Ruheatmung unter der Maske wird fortgesetzt. Für die folgende Messung wird auf den Programmteil „Rückatmung" (Zeitachse: 10 min) umgeschaltet. Es wird zunächst für weitere 2 - 3 min normal geatmet. Dann vergrößert ein Helfer den Totraum für 3 min um 500 ml, während die Versuchsperson stetig weiter atmet. Dazu wird ein Schlauch auf das vordere Ende des Pneumotachographen gesteckt. Nach Ablauf der 3 min wird die Registrierung für einige Minuten fortgesetzt, bis sich die Werte wieder normalisiert haben. Kleben Sie auch diese Registrierung ein und ermitteln Sie die Veränderungen von F_{O_2},A; F_{CO_2},A; f; V_T und V_E , die in der 3. min der Rückatmung zu beobachten sind.

c) Atemanhalten und willkürliche Hyperventilation

Schalten Sie auf den Programmteil „Jscope" um (Zeitachse: 3 min). Nach 5 - 10 normalen Atemzügen soll die Versuchsperson den Atem in Inspirationslage für mindestens 30 s anhalten. Anschließend wird bis zum Erreichen der Ausgangswerte weitergeatmet. Erst nach Normalisierung der Atmung wird in direktem Anschluss die willkürliche Hyperventilation durchgeführt. Dazu atmet die Versuchsperson für 10 s schnell und maximal tief ein und aus (bei Schwindel abbrechen; Hilfestellung durch einen Versuchsteilnehmer!). Die Atmung wird wiederum bis zum Erreichen des Ausgangswerts registriert.

Die Änderungen der endexspiratorischen O_2- und CO_2-Konzentrationen (F_{O_2},A u. F_{CO_2},A), die bei diesen Atemmanövern auftreten, sollen bestimmt werden. Notieren Sie auch die Dauer des Atemanhaltens sowie die Zeit bis zur Normalisierung der Werte.

Auswertung

Kleben Sie Ihre Registrierungen ins Skript ein und notieren Sie die Werte aus den Versuchsteilen a - c in den beiden folgenden Tabellen.

Versuch 1a
Atemstrom ("flow"), V_T, F_{O2} und F_{CO2}

Versuch 1b
Rückatmung: V_T, F_{O2}, F_{CO2}, BF

Auswertung Versuch a und b

	Ruhe	Hyperkapnie, 3. min	Änderung in %
V_T			
f			
V_T * f (Ventilation)			
$F_{CO2\ ,\ A}$			
$F_{O2,\ A}$			
AZQ		----------	----------

Auswertung Versuch c

	Ruhe	1. Atemzug nach _____ s Atemanhalten	Maximale Hyperventilation
$F_{CO2,\ A}$			
$F_{O2,\ A}$			

Bemerkungen:

Versuch 1c
Atemanhalten, Hyperventilation: V_T, F_{O2}, F_{CO2}

Zum Verständnis der Messgeräte

Der Atemstrom wird mit einem **Pneumotachographen** gemessen. Dabei wird entweder der Differenzdruck zwischen zwei Messstellen erfasst (Abb. 4.4, Prinzip des "Spirotests", vgl. Versuch 5) oder es wird ein kleiner Windflügel in den Atemstrom eingebracht, dessen Umdrehungen pro Zeiteinheit gezählt werden. Aus dem so erhaltenen Fluss in l/s werden geatmete Volumina durch Integration über die Zeit bestimmt. Die Messungen der CO_2- und O_2-Konzentration der In- und Exspirationsluft werden mit dem Oxycon α (Fa. Jaeger) durchgeführt. Die CO_2-Messung beruht auf dem Prinzip der **Ultrarotabsorption** (**URAS**, siehe Abb. 4.2). Die Messung der O_2-Konzentration des Atemgases beruht auf der **paramagnetischen Suszeptibilität des Sauerstoffs**: Wird Sauerstoff durch ein *inhomogenes* Magnetfeld geleitet, so entsteht durch die Kraftwirkung des Feldes auf die O_2-Moleküle ein erhöhter Partialdruck. Diese Partialdruckerhöhung ist der O_2-Konzentration des untersuchten Gasgemischs proportional und wird für die O_2-Messung eingesetzt (siehe Abb. 4.3). Das Oxycon α dient im Praktikum als universelles Messgerät. Eine **Eichung** zu Beginn des Versuchstages sichert, dass das Gerät korrekte Werte für O_2, CO_2 und Atemstrom ermittelt.

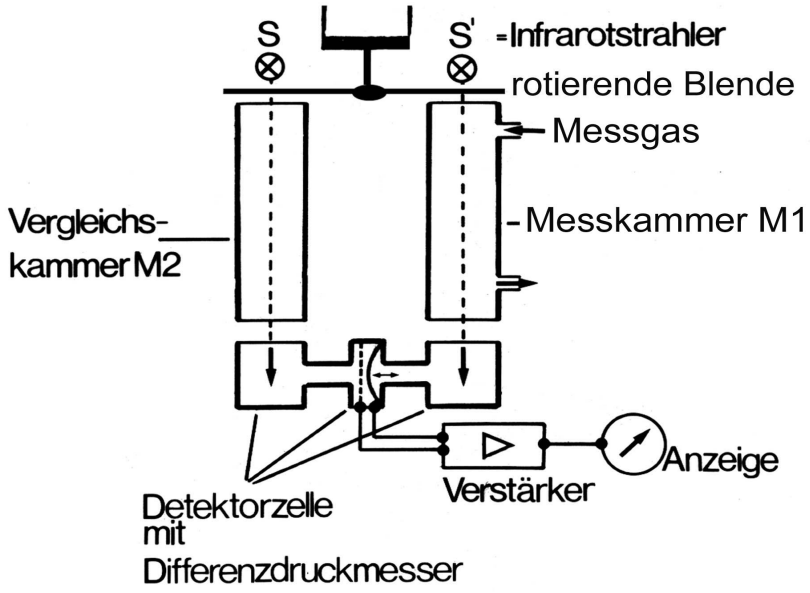


Abb. 4.2 **Funktionsprinzip des URAS**: Die von zwei Infrarotstrahlern (S, S´) erzeugten Wärmestrahlungen durchlaufen die vom Messgas durchströmte Messkammer (M1) und eine mit Vergleichsgas gefüllte Kammer (M2). Beide Strahlungen treffen auf die Detektorzelle, die aus zwei CO_2-gefüllten Kammern besteht. Diese absorbieren das „thermische Infrarot" (Wellenlänge ca. 4300 nm) und erwärmen sich. Da der Infrarotanteil der durch die Messkammer M1 laufenden Strahlung von der aktuellen CO_2-Konzentration abhängt, ist die Temperatur- und Druckerhöhung in beiden Detektorzellen verschieden: Eine als Membrankondensator konstruierte Trennwand zwischen beiden Detektorkammern wird proportional zur CO_2-Konzentration der Messkammer ausgelenkt (elektrische Wandlung). Die hohe Ansprechgeschwindigkeit des Gerätes (90 % des Messwertes in 0,1 s) erlaubt die Erfassung der CO_2-Änderung innerhalb eines Atemzyklus. Eine konstante Verzögerung zwischen der Atmung der Versuchsperson und der Registrierung entsteht jedoch durch die Weiterleitung des Testgases im Gerät. Das Oxycon α korrigiert jedoch die unterschiedlichen Laufzeiten von Volumen- und Gaspartialdruck-Werten und gibt sie zeitgleich aus. Der Sinn der rotierenden Blende besteht in einer periodischen Unterbrechung der Wärmestrahlung. Dadurch wird eine Überhitzung der Detektorzelle verhindert.

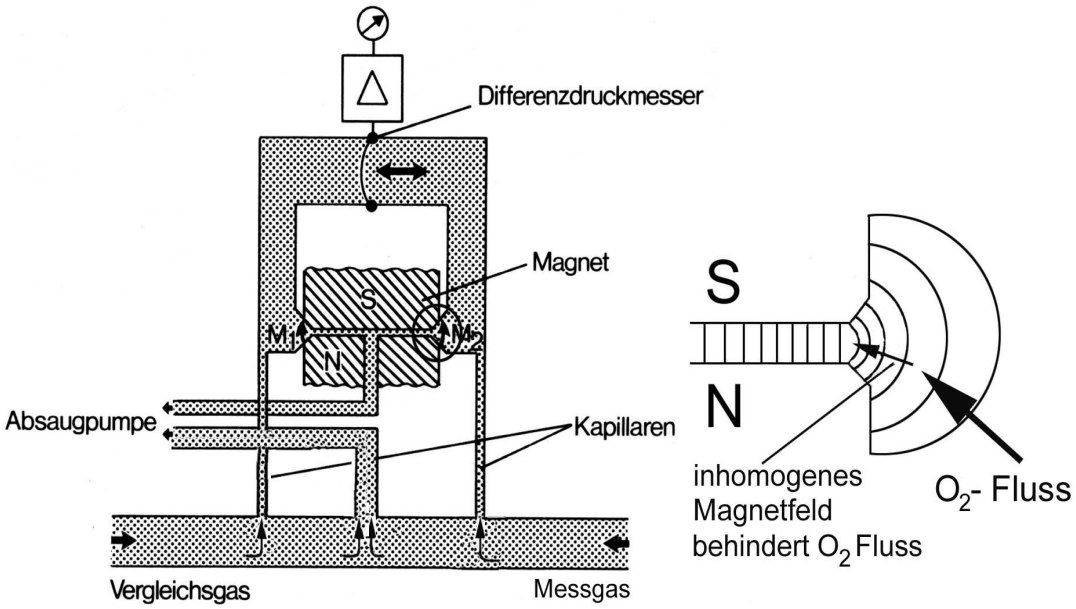


Abb. 4.3 **O_2-Bestimmung mit dem Oxycon α:** Das zu messende Gas und ein Vergleichsgas bekannter O_2-Konzentration (Luft mit 21 % O_2) wird den Messkammern (M1 und M2) mit dem gleichen negativen Ansaugdruck (Absaugpumpe) zugeführt. Nachdem beide Gasqualitäten ein gleiches Magnetfeld durchströmt haben, werden sie über eine gemeinsame Ableitung wieder abgeführt. Das zwischen Nordpol (N) und Südpol (S) bestehende Magnetfeld ist am Übergang zu den beiden Messkammern M1 und M2 inhomogen (d. h. die magnetischen Feldlinien sind nicht parallel). Im strömenden System bedingt die paramagnetische Suszeptibilität ("Empfänglichkeit") des O_2 eine Erhöhung des Strömungswiderstands, die proportional zum O_2-Gehalt (besser: O_2-Partialdruck) ist. Zwischen den Kammern M1 und M2 bildet sich daher ein Druckunterschied aus, der wie beim URAS-System von einem Differenzdruckmesser erfasst wird.

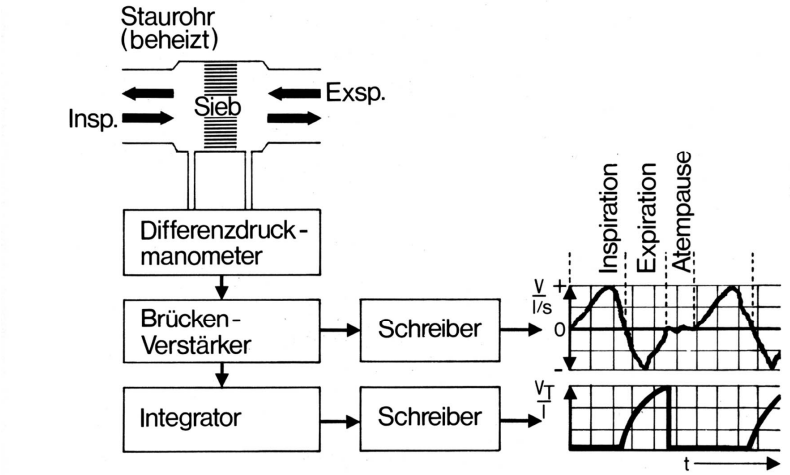


Abb. 4.4 **Messanordnung eines Pneumotachographen** (so eingesetzt z. B. im "Spirotest"). Zur Messung des Atemstroms wird die Atemluft durch ein sog. Staurohr geleitet. Ein Wabengitter im Innern hält die Strömung laminar. An zwei hintereinander liegenden Rohrstutzen wird eine Differenzdruckmessung vorgenommen. Nach dem Hagen-Poiseuilleschen-Gesetz (siehe Lehrbücher der Physik) ist diese Druckdifferenz der Strömungsgeschwindigkeit des Gases proportional. Mit einem hochempfindlichen Differenzdruckmanometer (messbar sind bereits wenige Pascal) lässt sich die Atemstromgeschwindigkeit in ein elektrisches Signal transformieren.

Zur Erfassung von Gasvolumina: ATPS-, BTPS-, STPD-Bedingungen

Das Volumen eines trockenen Gases hängt nach der idealen Gasgleichung (PV = nRT) vom Druck und von der Temperatur ab (vgl. Gesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac in Lehrbüchern der Physik). In der Atmungsphysiologie sind aus praktischen Gründen drei Messbedingungen gebräuchlich. Besondere Beachtung erfordert der Wasserdampf-Partialdruck.

Wird bei aktuellem Barometerdruck und Zimmertemperatur in geschlossenen Systemen gemessen (z.B. Glockenspirometer), so kann man von einem wasserdampfgesättigten Gasraum ausgehen. Man spricht dann von **ATPS-Bedingungen** (**A**mbient **T**emperature, **P**ressure, **S**aturated).

Sollen Angaben über Volumina und Atemstromstärken (Belüftungen) *innerhalb* der Lunge oder der Atemwege gemacht werden, ist die Körpertemperatur-bedingte Wärmeausdehnung der Gasvolumina mit einzubeziehen. Man rechnet dann auf **BTPS-Bedingungen** um (**B**ody **T**emperature, **P**ressure, **S**aturated) und es gilt:

$$V_{BTPS} = V_{ATPS} \cdot \frac{(P_B - P_{H_2O,\,R})\,T_K}{(P_B - P_{H_2O,\,K})\,T_R}$$

T_K = Körpertemperatur in K (T_K = 273 + 37° C)

T_R = Raumtemperatur in K (T_R = 273 + t° C)

P_B = Barometer-Luftdruck in Pa oder mmHg

$P_{H_2O,\,R}$ = Wasserdampfdruck bei Raumtemperatur in Pa bzw. mmHg. Bei Verwendung z. B. eines geschlossenen Spirometers kann 100%ige Wasserdampfsättigung angenommen werden.

$P_{H_2O,\,K}$ = Wasserdampfdruck bei Körpertemperatur in Pa oder mmHg

Sollen pro Zeiteinheit ausgetauschte Stoffmengen z. B. von O_2 und CO_2 berechnet werden, wird auf physikalische Normalbedingungen, d.h. **STPD-Bedingungen** umgerechnet (**S**tandard **T**emperature (0° C = 273 K), **P**ressure (760 mmHg bzw. 1013 mbar, hPa), **D**ry), und es gilt:

$$V_{STPD} = V_{ATPS} \cdot \frac{(P_B - P_{H_2O}) \cdot 273}{P_O \cdot T}$$

T = Lufttemperatur in K (T = 273 + t° C)

P_B = Barometer-Luftdruck in Pa bzw. mmHg

P_{H_2O} = Druck des gesättigten Wasserdampfes in Pa bzw. mmHg bei Temperatur T

P_O = Normaldruck = 101 325 Pa bzw. 760 mmHg (1 mmHg = 133,32 Pa)

Aus Vereinfachungsgründen können folgende Umrechnungsfaktoren benutzt werden, die sich im Rahmen des Praktikums als hinreichend genau erwiesen haben:

$$ATPS \cdot 1{,}1 \rightarrow BTPS$$
$$ATPS \cdot 0{,}9 \rightarrow STPD$$

2. Alveoläre und Totraumventilation, Bestimmung des RQ

Zielsetzung

In diesem Versuchsabschnitt soll unter Anwendung der Bohrschen Formel das Volumen des Totraums bestimmt werden. Dazu müssen zeitgleich V_T, der alveoläre P_{CO_2} und die gemischt-exspiratorische CO_2-Konzentration bestimmt werden.

Durch Multiplikation mit der Frequenz können ferner die Anteile der Totraumventilation ($\dot{V}_D$) und der alveolären Ventilation ($\dot{V}_A$) an der Gesamtventilation ($\dot{V}_E$) bestimmt werden.

Der Douglassack dient in diesem Versuch dazu, die gemischt-exspiratorischen Konzentrationen von O_2 und CO_2 aufzufangen. Gleichzeitig lassen sich diese Werte auch zur Bestimmung des RQ nutzen. Schwankungen der exspiratorischen Gaskonzentrationen, die von Atemzug zu Atemzug auftreten (vgl. Versuch 3), werden durch das große Volumen des Douglassacks ausgeglichen.

Versuchsanordnung

Siehe Abb. 4.1 und Beschreibung zu Versuch 1.
Es wird der Programmteil „Jscope“ eingesetzt (Zeitachse 3 min).

Versuchsdurchführung

Die Versuchsperson sitzt entspannt und atmet durch das an einen Dreiwegehahn angeschlossene Mundstück normale Raumluft ein. Die Nase ist mit einer Klemme verschlossen. Der Exspirationsstrom wird über eine Gasuhr, die das ausgeatmete Volumen misst, im Douglassack aufgefangen. Zur Adaptation atmet die Versuchsperson zunächst ein Testvolumen von ca. 10 l in den Douglassack. Um korrekte Werte zu erhalten, ist es besonders wichtig, dass während der ganzen Zeit normal geatmet wird! Da der erste Inhalt des Douglassacks noch Anteile von Raumluft enthält, wird er verworfen, während die Versuchsperson weiter atmet (schnelle Entleerung über Dreiwegehahn). Die O_2- bzw. CO_2-Gehalte der aktuellen sowie der gesammelten Atemluft werden mit Hilfe des Oxycon α bestimmt.

Zur Bestimmung von V_A kann die allgemeine Form der Bohrschen Formel eingesetzt werden (siehe Lehrbücher der Physiologie). Handlicher ist die folgende, auf das Praktikum abgestimmte Formelherleitung, bei der nur das CO_2 berücksichtigt wird: Man geht formal davon aus, dass die inspiratorische, alveoläre und exspiratorische CO_2-Konzentration jeweils vollständig in V_D, V_A bzw. V_T auftritt, so dass gilt:

$$V_T \cdot F_{CO_2,E} = V_D \cdot F_{CO_2,I} + V_A \cdot F_{CO_2,A}$$

Da $F_{CO_2,I}$ nahezu 0 ist, ergibt sich zur Berechnung von V_A die Formel:

$$V_A = V_T \cdot \frac{F_{CO_2,E}}{F_{CO_2,A}}$$

$F_{CO_2,E}$ = fraktionelle exspiratorische CO_2-Konzentration

$F_{CO_2,A}$ = fraktionelle alveoläre CO_2-Konzentration

V_T = Atemzugvolumen, hier exspiratorisch gemessen

V_A = ventilierter Anteil des Alveolarraums

Versuchsablauf

Nach der Entleerung des Testvolumens (s. o.) beginnt die eigentliche Füllung des Douglassacks. Beim ersten Atemzug, der zum 10 l Volumen beiträgt (Gasuhranzeige notieren), wird die Registrierung der endexspiratorischen Gaskonzentrationen $F_{O_2,A}$ u. $F_{CO_2,A}$ gestartet. Sobald 10 l geatmet wurden, wird die Versuchperson vom Mundstück getrennt. Bei laufender Registrierung wird dann der Inhalt des Douglassacks mit dem Oxycon α über einen Schlauch verbunden, um die gemischt-exspiratorischen O_2- und CO_2-Konzentrationen ($F_{O_2,E}$ u. $F_{CO_2,E}$) bestimmen zu können. V_T wird bestimmt, indem das geatmete Volumen (Soll 10 l) durch die Anzahl der benötigten Atemzüge geteilt wird.

Auswertung

Totraum und alveoläre Ventilation

Die end-exspiratorischen $F_{CO_2,A}$-Werte aller Atemzüge, die zum 10 l Volumen beigetragen haben, werden gemittelt und zusammen mit dem gemischt-exspiratorischen Wert und dem mittleren V_T in die unten stehende Formel eingesetzt (siehe nächster Kasten). Damit ergibt sich zunächst der alveoläre Anteil V_A des Atemzugvolumens:

	Messwerte
$F_{CO_2,E}$ (fraktionelle gemischt-exspiratorische CO_2-Konzentration)	
$F_{CO_2,A}$ (fraktionelle alveoläre CO_2-Konzentration)	
V_T (Atemzugvolumen)	ml
V_A (ventilierter Anteil des Alveolarraums)	ml

Mit Kenntnis von V_A und V_T bestimmt sich der **Totraum** V_D nach: $V_D = V_T - V_A$

	Messwert
V_D (Totraum)	ml

Durch Multiplikation mit der **Atemfrequenz** f (Atemzüge/min, aus der Registrierung zu bestimmen) ergeben sich die zugehörigen **Ventilationsgrößen**:

	Messwerte
Frequenz (f)	1/min
Ventilation ($\dot{V}_T = V_T \cdot f$)	ml/min
alveolare Ventilation ($\dot{V}_A = V_A \cdot f$)	ml/min
Totraumventilation ($\dot{V}_D = V_D \cdot f$)	ml/min

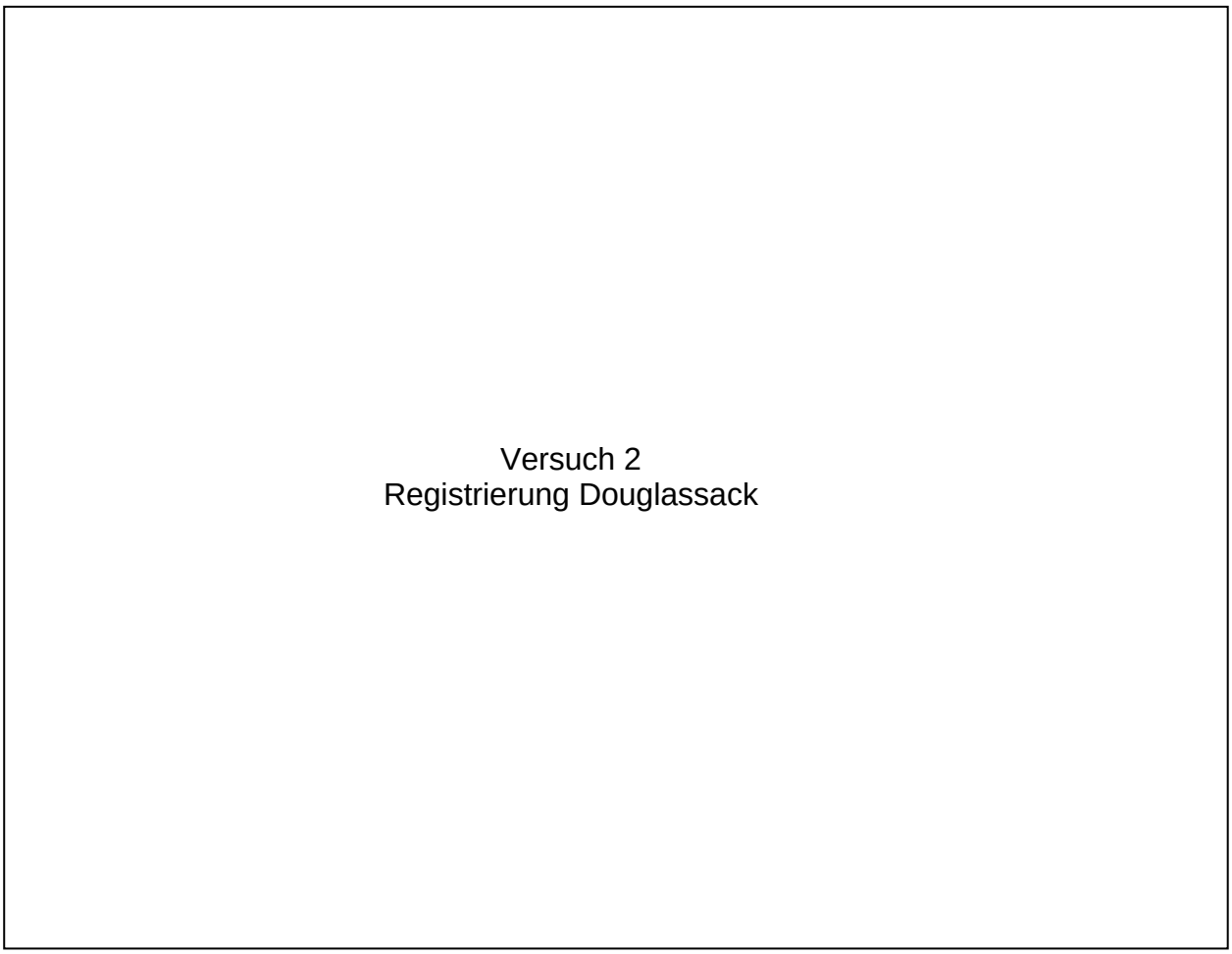
Respiratorischer Quotient (RQ, RER)

Er ist definiert als Quotient von CO_2-Abgabe und O_2-Aufnahme.

$$RQ = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}}$$

In unserem Experiment lassen sich für die Berechnung des RQ die Zunahme der fraktionellen CO_2- und die Abnahme der fraktionellen O_2-Konzentration im Douglassack benutzen, da diese ja zeitgleich entstanden sind. Daher gilt im steady state:

$$RQ = \frac{F_{CO_2}}{(F_{O_2,I} - F_{O_2,E})}$$



3. Atmung und Energieumsatz bei körperlicher Belastung

Zielsetzung

Dieser Versuch soll Ihnen die Veränderungen der Atmung bei körperlicher Leistung zeigen. Ferner sollen Sie lernen, dass der O_2-Verbrauch genutzt werden kann, um den Energieumsatz des Organismus zu bestimmen. Für diese **indirekte Kalorimetrie** benötigen Sie jedoch unbedingt einen Normwert, der Ihnen sagt, wie der O_2-Verbrauch mit der Energieproduktion verknüpft ist. Dieser Normwert ist das **kalorische Äquivalent**, das vom jeweils verstoffwechselten „Brennstoff" abhängt. Dementsprechend finden Sie weiter unten eine Tabelle, in der das kalorische Äquivalent in Abhängigkeit vom aktuellen RQ aufgeführt ist.

In dem Experiment werden die Veränderungen von V_T, f, O_2-Aufnahme und CO_2-Abgabe *kontinuierlich* aufgezeichnet. Auch andere abgeleitete Größen wie RQ und Atemäquivalent[1] werden online dargestellt. Sie werden sehen, dass der RQ von Atemzug zu Atemzug scheinbar schwankt, da nur die Mittelung den wahren, die Stoffwechsellage repräsentierenden Wert wiedergibt ("Stoffwechsel-RQ"). Möglicherweise wird der RQ unter einer Belastung von 100 W auch Werte oberhalb des theoretischen Höchstwertes von 1 annehmen. Diese kurzzeitige Entgleisung des "Atmungs RQs" passiert immer dann, wenn eine vermehrte CO_2-Abgabe, z. B. infolge einsetzender Laktazidose, stattfindet. In der Sportmedizin nutzt man diesen Effekt zur Ermittelung der Dauerleistungsgrenze.

Ein Vergleich von erbrachter Leistung (die Watt-Zahl am Fahrradergometer) und aufgewendeter Leistung (die zu berechnende, vom Probanden geleistete Watt-Zahl) erlaubt schließlich, den **Wirkungsgrad** der Beinmuskelarbeit zu berechnen.

Versuchsanordnung

Die Versuchperson liegt auf einem Fahrradergometer mit Wirbelstrombremse und ist über eine Atemmaske an die CO_2-, O_2- und Flussanalysatoren angeschlossen. Für die Registrierung wird das Programm „Fahrrad-Erg" (Oxycon α) aufgerufen.

Versuchsdurchführung

Nach Aufzeichnung einer 3 min dauernden Ruhephase beginnt die Versuchsperson, das Fahrradergometer mit möglichst 70 U/min zu betätigen. Am Gerät wird die zu erbringende Leistung von 100 Watt eingestellt. Diese soll für etwa 3 min aufrechterhalten werden, bis der O_2-Verbrauch konstante Werte annimmt.

Ein Helfer kontrolliert dabei die Pulsfrequenz. Beim Auftreten von Beschwerden ist der Versuch sofort abzubrechen!

Auswertung

Kleben Sie die Original-Registrierung in Ihr Skript ein. Ermitteln Sie die in der Tabelle aufgeführten Werte aus den Messdaten und berechnen Sie den Wirkungsgrad der Beinarbeit.

Wirkungsgrad:
Das für die Berechnung des Wirkungsgrades geeignete kalorische Äquivalent ermitteln Sie mit Hilfe desjenigen RQ, der im Mittel unter Ruhebedingungen registriert wurde. Nutzen Sie die unten stehende Tabelle.

[1] $EQO_2 = V_E/VO_2$. Das Atemäquivalent besagt, wie viel Liter Luft ventiliert werden, um einen Liter O_2 aufzunehmen (bedeutsam in der Sportmedizin).

1. Ermitteln Sie zunächst den O_2-*Mehrverbrauch* (umrechnen von ml/min in l/s!) unter Belastung (100 W) im Vergleich zur Ruhe.
2. Multiplikation des O_2-Mehrverbrauchs mit dem kalorischen Äquivalent ergibt die Zunahme des Energieumsatzes bei 100 W erbrachter Leistung. (Es gilt: 1 W = 1 J/s)
3. Teilen Sie die erbrachte Leistung von 100 W durch den unter 2 erhaltenen Wert und multiplizieren Sie mit 100.

RQ	kJ/l O_2	kcal/l O_2
1,00	21,14	5,05
0,95	20,89	4,99
0,90	20,64	4,93
0,85	20,38	4,87
0,80	20,13	4,81
0,75	19,88	4,75
0,70	19,63	4,69

Tabelle der kalorischen Äquivalente in Abhängigkeit vom RQ (nach Keidel)

Versuch 3
Atmung bei körperlicher Belastung

	Ruhe	Belastung 100 W, 3. min	Änderung in %
V_T			
f			
CO_2 - Abgabe (ml/min)			
O_2 - Aufnahme (ml/min)			
RQ (RER)		----------	----------
Kalorisches Äquivalent (kJ/l O_2)		----------	----------
Energieumsatz (kJs^{-1})			
Wirkungsgrad bei 100 W erbrachter Leistung (in %)	----------		----------

O_2-Verbrauch und CO_2-Abgabe

Die Bestimmung der **O_2-Aufnahme der Lunge** erfolgt durch Vergleich der inspiratorischen und exspiratorischen O_2-Fraktion in den jeweiligen Volumina.

Es gilt:

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{V}_I \cdot F_{O_2,I} - \dot{V}_E \cdot F_{O_2,E}$$

Rechenbeispiel für ein trockenes Gas:

Bei 21 % O_2 in der Außenluft, 18 % O_2 gemischt-exspiratorisch und einem Atemminutenvolumen von 6 l errechnet sich die O_2-Aufnahme/min zu:

$$6\,l \times 0{,}21 - 6\,l \times 0{,}18 = 0{,}24\,l$$

Für die **CO_2-Abgabe** gilt entsprechend:

$$\dot{V}_{CO_2} = \dot{V}_E \cdot F_{CO_2,E} - \dot{V}_I \cdot F_{CO_2,I}$$

was bei genügend niedriger CO_2-Konzentration in der Einatmungsluft vereinfacht werden kann zu:

$$\dot{V}_{CO_2} = \dot{V}_E \cdot F_{CO_2,E}$$

Bedenken Sie aber, dass die so gemessene O_2-*Aufnahme* bzw. CO_2-*Abgabe* nicht zwangsläufig dem O_2-*Verbrauch* bzw. der CO_2-*Produktion* entsprechen! Diese Unterscheidung ist bei kurzen Beobachtungszeiträumen wichtig! Das Oxycon α ermittelt die o. g. Parameter für *jeden* Atemzug („breath by breath"), indem es Gaspartialdrucke und Flusswerte jeweils über die Zeit der Inspiration und Exspiration integriert.

4. Bestimmung von Atemgrößen mit dem Glockenspirometer

Zielsetzung

Bei dieser Übung werden Atemzugvolumen, Atemfrequenz, Atemminutenvolumen, Sauerstoffverbrauch, inspiratorisches und exspiratorisches Reservevolumen, Vitalkapazität, Ein-Sekunden-Ausatmungskapazität und Atemgrenzwert auf klassische Weise mit einem Glockenspirometer bestimmt (g*eschlossenes* System). Wegen der Konstanz des Volumenbehälters ist eine Eichung hier nicht erforderlich.

Versuchsanordnung

Gemessen wird mit dem Glockenspirometer (Abbildungen 4.5 und 4.6), das kurz vor Versuchsbeginn mit O_2 befüllt wird. Die Atmung der Versuchsperson ist über ein Mundstück und einen 3-Wege-Hahn (der das Umschalten der Atmung zwischen Außenluft und Spirometer gestattet) an die Spirometerglocke angeschlossen. Sobald das Lungenvolumen mit dem des Spirometers verbunden wird, zeigt das Heben und Senken der Spirometerglocke die Atembewegungen an. Die Auslenkung der Glocke ist V_T proportional und wird auf einem Kymographen als Spirogramm aufgezeichnet.

Zur Verhinderung von Hypoxie und Hyperkapnie ist nicht nur die O_2-Befüllung wichtig. Eine Pumpe wälzt das Gasvolumen innerhalb des Spirometers kontinuierlich um und führt die Luft durch ein **Gefäß mit Natronkalk** (NaOH). Dort wird das ausgeatmete CO_2 in $NaCO_3$ überführt. Das Volumen innerhalb der Glocke nimmt dabei in dem Maße ab, wie O_2 verbraucht wird. Diese Volumenverminderung, die als Anstieg in der Registrierung deutlich wird (Abb. 4.7), zeigt den **O_2-Verbrauch** des Probanden indirekt an.

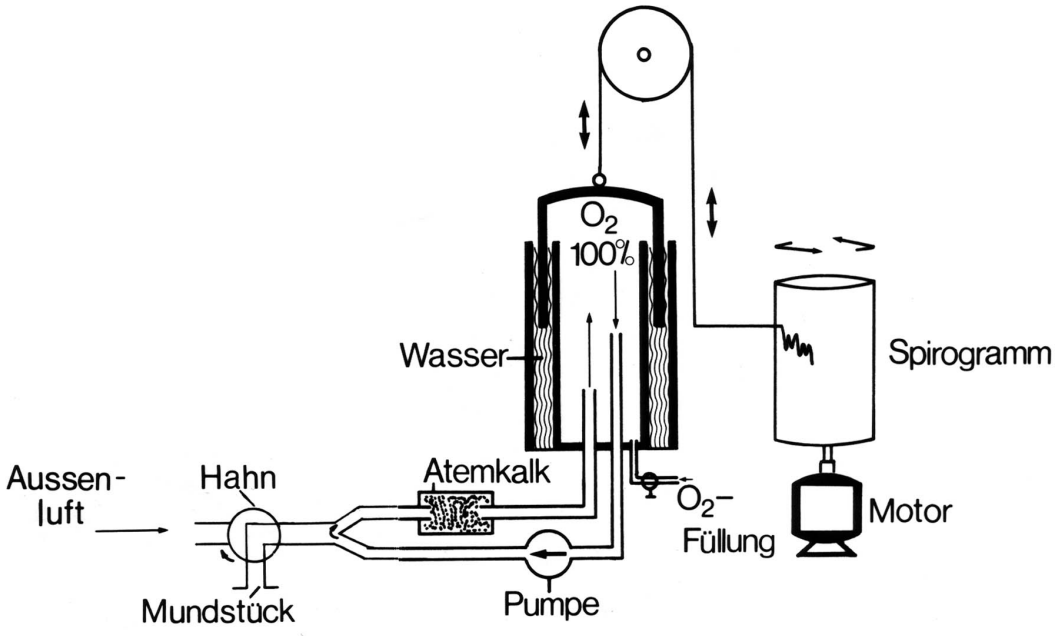


Abb. 4.5 Funktionsschema des Glockenspirometers

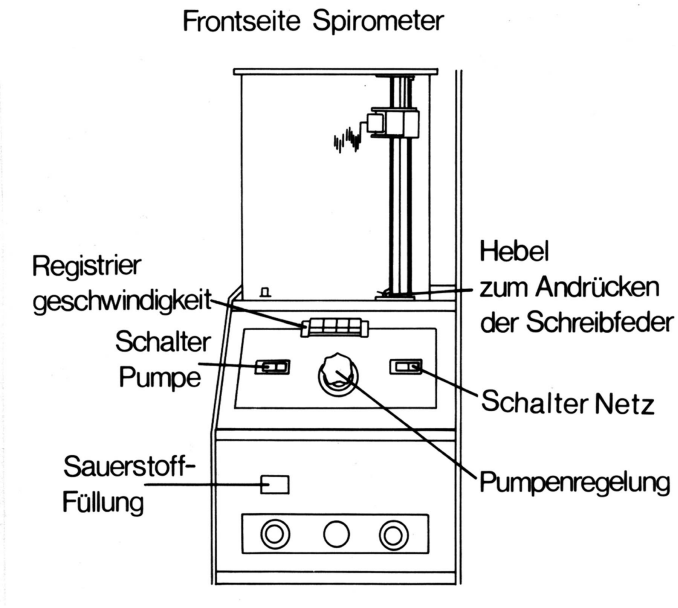


Abb. 4.6 Vorderansicht des Glockenspirometers

Durchführung

Machen Sie sich zunächst anhand der Abbildungen 4.5 und 4.6 mit dem Gerät vertraut. Folgende Einstellungen sind am Gerät zu wählen: Netzschalter am Spirometer auf EIN, Förderleistung der Umwälzpumpe auf 75 l/min stellen. Kontrollieren, ob Sauerstoffdruck am Druckminderer der Flasche ca. 1 bar beträgt; der Atemkalk darf keine violette Verfärbung zeigen (CO_2-Beladung!). Vor Beginn des Versuches System zur Füllung mit O_2 durchspülen. Dazu – bei abgestellter Pumpe – den Hahn so stellen, dass er das Spirometer mit der Außenluft verbindet! Glocke durch *langsames* (!) Herunterdrücken vorsichtig entleeren, Glocke wieder mit Sauerstoff füllen (dazu Knopf FÜLLUNG so lange drücken, bis Füllhöhe erreicht). Vorgang zweimal wiederholen. Hahn wieder so stellen, dass in das Spirometer geatmet werden kann.

Wichtig: Die Spirometerglocke darf nicht bis zum Anschlag gefüllt werden, da sonst für die Exspiration kein Volumen mehr zur Verfügung steht!

Nun die Atmungspumpe einschalten, damit eine Umwälzung der Luft im geschlossenen System erfolgt! Papiergeschwindigkeit vorwählen. Die Registrierung läuft erst, wenn die rote Taste EIN gedrückt wird (zum Umschalten auf eine andere Geschwindigkeit während des Laufes entsprechende Geschwindigkeitstaste drücken). Registrierfeder mittels Hebel an die Registrierplatte anlegen. Ein Nachfüllen der Glocke mit Sauerstoff kann auch während der Registrierung erfolgen, ohne die Versuchsperson vom System trennen zu müssen, und zwar durch Drücken des Knopfes "FÜLLUNG" bis zur gewünschten Füllhöhe bei Stellung des Mundstücks auf Atemluft.

Wichtig: Falls eine O_2-Nachfüllung während des Versuchs notwendig ist, muss diese unbedingt vor der vollständigen Leerung der Glocke vorgenommen werden. Hypoxiegefahr!

Versuchsablauf

Die Messungen werden im Stehen ausgeführt: Die Versuchsperson nimmt dabei das Mundstück zwischen Lippen und Zähne und verschließt die Nase mit einer Nasenklemme. Sie sollte so stehen, dass sie während der Messung ihre *eigene Registrierung nicht sehen* kann. Die anderen Praktikumsteilnehmer übernehmen jeweils die Bedienung des Spirometers, führen Protokoll, leisten u. U. **Hilfestellung**.

Die Teilversuche 3a bis 3f werden von der Versuchsperson möglichst hintereinander absolviert, ohne das Spirometer zu verlassen und ohne Umschaltung auf Außenluft.

a) **Ruheatmung**: Der geringere visköse Widerstand verleitet leicht zur Hyperventilation. Zur Gewöhnung an das System wird der Hahn daher zunächst 1 - 2 min auf Außenluft geschaltet, erst dann wird auf das Spirometer umgestellt und die Ruheatmung für 4 - 5 min registriert. Registriergeschwindigkeit: 30 mm/min.

b) **Inspiratorisches Reservevolumen (IRV)**: Nach einigen normalen Atemzügen einmal maximal tief einatmen.

c) **Exspiratorisches Reservevolumen (ERV)**: Nach weiteren normalen Atemzügen einmal maximal tief ausatmen.

d) **Vitalkapazität (VC)**: Langsam maximal tief einatmen – maximal tief ausatmen.

e) **Einsekundenausatmungskapazität** (FEV1=forciertes exspiratorisches Volumen, Tiffeneau-Test): Nach zügiger, submaximal tiefer Inspiration kurz (1 - 2 s) die Luft anhalten (Plateau beim Registrieren). Registriergeschwindigkeit auf 1200 mm/min erhöhen und dann *so rasch und vollständig wie möglich* ausatmen. Gemessen wird das Exspirationsvolumen während einer Sekunde vom Abknicken des Plateaus an (FEV1). Aus dem Absolutwert soll die relative Sekundenkapazität (FEV1%VC) berechnet werden, indem auf die VC = 100 % normiert wird.

f) **Atemgrenzwert (AGW)**: Dies ist das maximale, *theoretisch* während 1 min ventilierbare Atemminutenvolumen (AMV). Die Registriergeschwindigkeit beträgt 30 mm/min. Die Versuchsperson steht bei diesem Versuch und atmet während *höchstens 10 s so rasch und so tief wie möglich ein und aus.* Ein Teilnehmer stoppt die Zeit, zwei andere leisten Hilfestellung, da bei Hyperventilation Schwindel auftreten kann (warum?). In diesem Fall soll der Versuch vorzeitig abgebrochen werden.

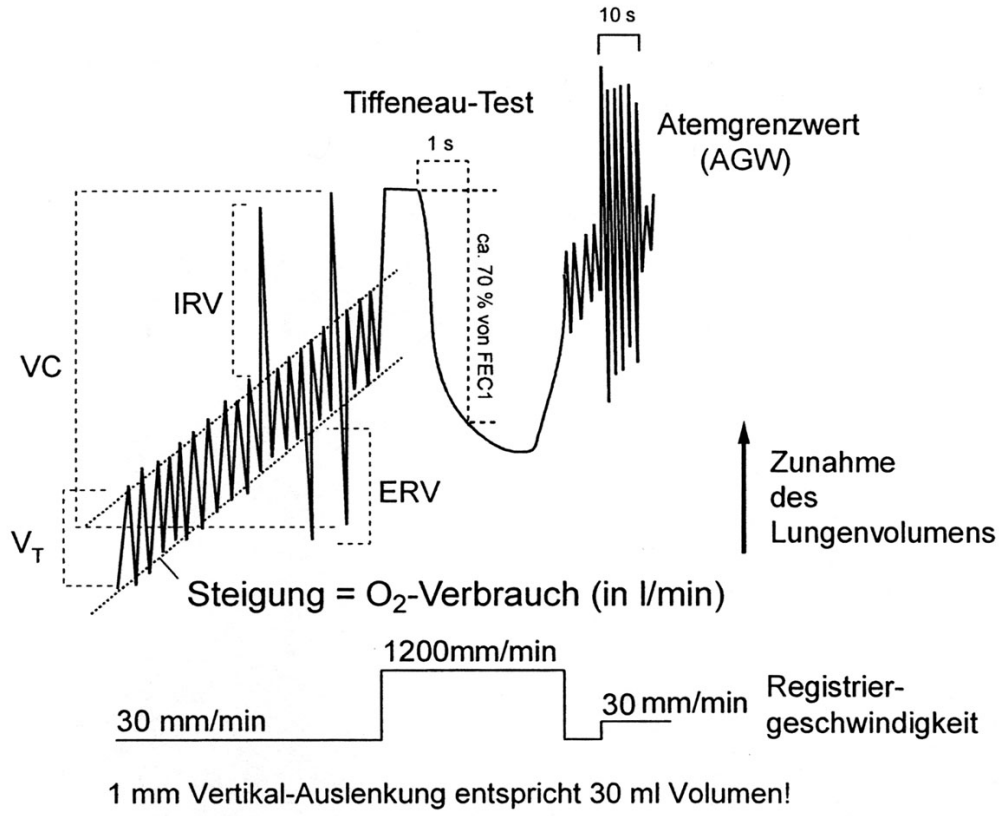


Abb. 4.7 Schema einer Registrierung am Glockenspirometer

Versuch 4
Registrierung der Atmung mit dem Glockenspirometer

Auswertung Glockenspirometer (vgl. Abb. 4.7):

Körpergröße in cm	Alter, Jahre	Geschlecht, m/w

	Dimension	ATPS	BTPS	STPD
V_T	ml			
f	1/min			
V_T * f (Ventilation)	l/min			
IRV	ml			
ERV	ml			
VC (Vitalkapazität)	ml			
FEV1	ml			
FEV1%VC	%			
Atemgrenzw. (AGW)	l/min			
O_2-Aufnahme (V_{O2})	l/min			

Die unter ATPS-Bedingungen gemessenen Volumina werden auf BTPS-Bedingungen umgerechnet (s. S. 5.9), um die aus der Lunge strömenden Volumina angeben zu können.

Der O_2-Verbrauch wird unter STPD-Bedingungen angegeben.

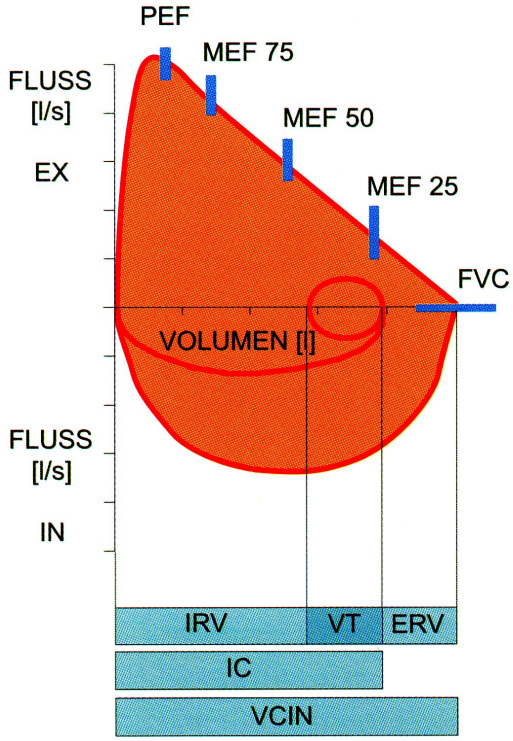
5. Bestimmung von Atemgrößen mit dem Spirotest

Zielsetzung

Die Funktionen des Glockenspirometers können heute von handlicheren Geräten erfüllt werden (Ausnahme: O_2-Messung). Im Praktikum wird dazu das "Spirotest"-Messgerät (Fa. Jaeger) eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein offenes Spirometer (vgl. Abb. 4.4), das Mikroprozessor-gesteuert wesentliche Atemgrößen analysiert und mit Normgrößen vergleicht. Im Unterschied zum Glockenspirometer erstellt das Gerät eine Fluss-Volumen-Kurve (Abb. 4.8), die Auskunft über veränderte *Strömungsparameter* der Lunge erlaubt. Die Fluss-Volumen-Kurve ist daher von großer diagnostischer Bedeutung.

Versuchsanordnung und Durchführung

Jede Versuchsperson erhält ein zum Gerät passendes Mundstück, das bereits Teil eines Pneumotachographen ist. Nach Eingabe der relevanten persönlichen Daten (Alter, Größe, Gewicht, Geschlecht) führt sie die vom Gerät geforderten Atemmanöver aus. Über einen an das Gerät angeschlossenen Drucker werden die ermittelten Atemgrößen einschließlich der Fluss-Volumen-Kurve ausgegeben.



VC	Vitalkapazität
FVC	forcierte exspiratorische Vitalkapazität
FEV1	forciertes exspiratorisches Volumen nach 1 Sekunde
FEV1%VC	FEV1 in % der max. Vitalkapazität
PEF	maximaler exsp. Fluss (Peak Flow)
MEF25	maximaler exspiratorischer Fluss bei 25 % der FVC
MEF50	maximaler exspiratorischer Fluss bei 50 % der FVC
MEF75	maximaler exspiratorischer Fluss bei 75 % der FVC
MMEF	mittlerer max. exspir. Fluss zwischen 25 und 75 % der FVC
PIF	maximaler inspiratorischer Fluss

Abbildung 4.8 Fluss-Volumen-Kurve mit Messgrößen, aufgenommen mit dem Spirotest (aus der Betriebsanleitung des Spirotest-Messgeräts, Fa. Jaeger)

Auswertung

Die Auswertung erfolgt automatisch durch den eingebauten Mikroprozessor.

Dennoch: Prüfen Sie das Messergebnis auf Wiederholgenauigkeit! Vergleichen Sie die Werte für VC mit denen vom Glockenspirometer! Simulieren Sie auch eine schlechte Mitarbeit! Vergleichen und diskutieren Sie die Werte ihrer Gruppe. Kleben Sie Ihr Messergebnis auf der nächsten Seite ins Skript ein und notieren Sie dort Ihre Befunde.

Protokollblatt Spirotest

6. Bestimmung von Atemfluss und –volumen mit dem Spirometerpod und LabTutor (ADInstruments)

Einführung

In diesem Labor lernen Sie die Spirometrie als Verfahren zur Aufzeichnung von Atmungsvariablen kennen und analysieren eine Aufzeichnung, um Atmungsparameter abzuleiten. Sie untersuchen Lungenvolumen und -kapazitäten, führen grundlegende Lungenfunktionstests durch und simulieren Atemwegseinschränkungen.

Lernziele

Zum Ende des heutigen Labors werden Sie in der Lage sein:

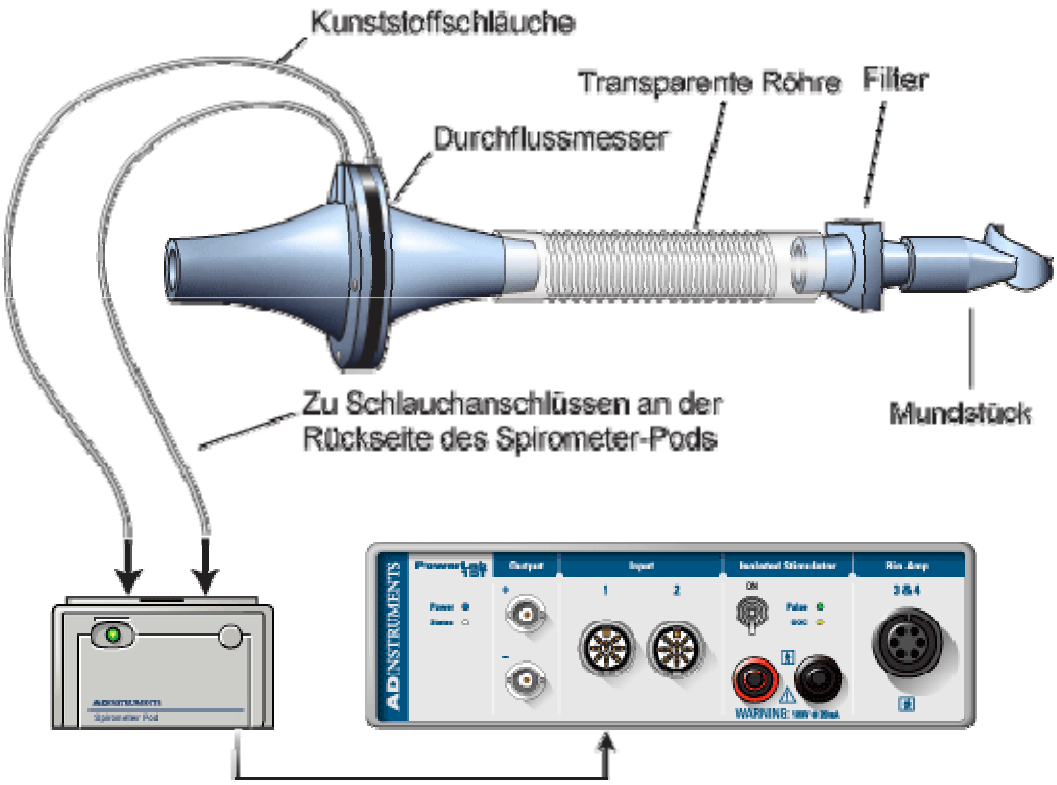
- die Prinzipien der Spirometrie zu erläutern und zu erklären, wie sich aus der Integration des Flusssignals ein Volumen ermitteln lässt.
- die aufgezeichneten Lungenvolumen und -kapazitäten mit denen einer typischen Person desselben Geschlechts, derselben Größe und desselben Alters in Beziehung zu setzen.
- Lungenfunktionstests durchzuführen, die daraus resultierenden Messergebnisse zu erläutern (PIF, PEF, FVC und FEV_1) und diese Messergebnisse mit einer typischen Person desselben Geschlechts, derselben Größe und desselben Alters in Beziehung zu setzen.
- die Auswirkungen von Atemwegseinschränkungen auf PIF, PEF, FVC and FEV_1 zu beschreiben.

Geräteaufbau

Vorgehensweise

1. Schließen Sie den Spirometer-Pod an den Pod-Port für Input 1 des PowerLab an.
2. Da der Spirometer-Pod temperaturempfindlich ist und während der Aufwärmphase zu Abweichungen neigt, schalten Sie das PowerLab mindestens 5 Minuten vorher ein. Um temperaturbedingte Abweichungen aufgrund einer Erwärmung des Pods zu vermeiden, legen Sie ihn in einiger Entfernung vom Netzteil auf ein Regal oder neben das PowerLab.
3. Verbinden Sie die beiden Kunststoffschläuche des Atemdurchflussmessers mit den kurzen Röhrchen an der Rückseite des Spirometer-Pods.
4. Bringen Sie die transparente Röhre, einen Filter und ein Mundstück am Durchflussmesser an.
5. Vergewissern Sie sich, dass Ihnen für die verschiedenen Teile des Experiments folgende Ausrüstung zur Verfügung steht:
   - Maßband zum Messen der Größe des Probanden.
   - Klebeband und Kugelschreiber oder spitzer Bleistift für die Simulation der Atemwegseinschränkung.
   - Zusätzliche Mundstücke und Einwegfilter für jeden Probanden.

Wichtig: Wenn Sie an einer Atemwegsinfektion leiden, stellen Sie sich nicht als Proband für dieses Experiment zur Verfügung.



©2007 ADInstruments

Zurücksetzen des Spirometer-Pods auf null

Der Spirometer-Pod neigt zu thermalen Abweichungen des Basisliniensignals. Um bei der Volumenmessung zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, ist es wichtig, die Basislinie jedes Mal vor Beginn einer neuen Aufzeichnung über die Schaltfläche **Pod zurücksetzen** auf null zu setzen.

Vorgehensweise

1. Lassen Sie den Durchflussmesser unberührt auf der Bank liegen und klicken Sie auf die Schaltfläche „Pod zurücksetzen“. Dadurch wird die Abweichung des Flusskanals auf null zurückgesetzt.
2. Klicken Sie auf **Starten**. Der Proband kann nun das Mundstück in den Mund nehmen und den Durchflussmesser vorsichtig mit beiden Händen **festhalten**.
   Hinweis: Damit das Volumen richtig aus dem Fluss berechnet werden kann, ist es unerlässlich, die Aufzeichnung bereits zu starten, bevor der Proband in den Durchflussmesser atmet.
3. Setzen Sie dem Probanden die Nasenklammer auf. Dadurch wird sichergestellt, dass die gesamte Atemluft durch Mundstück, Filter und Durchflussmesser strömt.
4. Beobachten Sie die Spur. Das Signal sollte beim Ausatmen eine Abweichung nach unten aufweisen. Falls das Signal nach oben abweicht, **stoppen** Sie die Aufzeichnung und drehen den Durchflussmesser um oder tauschen die Schlauchanschlüsse am Spirometer-Pod gegeneinander aus.
5. Sobald sich der Proband an den Apparat gewöhnt hat und normal atmet, stoppen Sie die Aufzeichnung und fahren mit der nächsten Seite fort.

Volumenkorrektur

Hinweis: Der Kursleiter wird diese Volumenkorrektur u. U. nicht für notwendig halten. Bitte fragen Sie nach, bevor Sie fortfahren. Blättern Sie ggf. zur nächsten Seite.

Unter den meisten atmosphärischen Bedingungen ist das Volumen der ausgeatmeten Luft größer als das der eingeatmeten Luft. Dieser Anstieg, der auf Erwärmung und Befeuchtung zurückzuführen ist, liegt gewöhnlich bei 5 bis 10 %. Aus diesem Grund wird üblicherweise ein Volumenkorrekturfaktor auf den Volumenkanal angewendet.

Vorgehensweise

1. Setzen Sie den Spirometer-Pod über die Schaltfläche **Pod zurücksetzen** wieder auf null zurück. Denken Sie daran, dass der Durchflussmesser auf der Bank beim Zurücksetzen nicht bewegt werden darf.
2. Klicken Sie auf **Starten**. Sobald die Aufzeichnung beginnt, bitten Sie den Probanden, den Durchflussmesser aufzunehmen und normal hineinzuatmen.
3. Lassen Sie den Probanden einmal vollständig durch den Durchflussmesse ausatmen und dann eine Minute lang normal weiteratmen.
4. Während die Aufzeichnung fortgesetzt wird, fügen Sie den **Kommentar** „Volumenkorrekturverfahren“ in die Daten ein.
5. Lassen Sie den Probanden nach Ablauf einer Minute nochmals vollständig ausatmen.
6. Klicken Sie auf **Stoppen**. Der Proband kann nun aufhören, in den Durchflussmesser zu atmen und die Nasenklammer abnehmen.

Analyse

1. Markieren Sie die gesamte Aufzeichnung der Atmungsdaten, einschließlich der beiden forcierten Exspirationen, indem Sie auf die Zeitachse unter der Spur doppelklicken (dadurch wird ein Datenblock ausgewählt).
2. Der Standardwert für den Volumenkorrekturfaktor beträgt 1,08. Nachdem Sie die entsprechenden Daten ausgewählt haben, schlägt LabTutor einen neuen Volumenkorrekturfaktor vor. Wenn Sie diesen akzeptieren möchten, klicken Sie auf die Schaltfläche „Übernehmen“.

Übung 1

In dieser Übung untersuchen Sie den Atmungszyklus und messen die Volumenänderung.

Bei der Aufzeichnung von normaler Atmung ist es wichtig, dass der Proband die Atmung nicht bewusst kontrolliert. Der Proband sollte vom Computerbildschirm abgewandt sein und zur Ablenkung u. U. aus dem Fenster sehen oder ein Buch lesen.

Vorgehensweise

1. Setzen Sie den Spirometer-Pod über die Schaltfläche **Pod zurücksetzen** wieder auf null zurück. Denken Sie daran, dass der Durchflussmesser auf der Bank beim Zurücksetzen nicht bewegt werden darf.
2. Klicken Sie auf **Starten**. Sobald die Aufzeichnung beginnt, bitten Sie den Probanden, die Nasenklammer wieder aufzusetzen und normal in den Durchflussmesser zu atmen. Zeichnen Sie die normale Atmung 1 bis 2 Minuten lang auf.
3. Fügen Sie den Daten während der Aufzeichnung den **Kommentar** „Normale Atmung“ hinzu.
4. Bitten Sie den Probanden nach Ablauf der normalen Atmungsperiode bzw. dem letzten normalen Ausatmen, so tief wie möglich **einzuatmen** und dann so tief wie möglich **auszuatmen**. Lassen Sie den Probanden anschließend wieder normal atmen und **stoppen** Sie die Aufzeichnung.
5. Fügen Sie diesen tiefen Atemzügen den Kommentar „Lungenvolumenverfahren“ hinzu.

Analyse

Gehen Sie wie unten beschrieben vor, um die Tabelle zu vervollständigen.

1. Überprüfen Sie die Daten der normalen Atmung. Berechnen Sie die Anzahl der Atemzüge pro Minute (BPM). Geben Sie das Ergebnis in die entsprechende Zelle der Tabelle ein.
2. Ermitteln Sie das Volumen einer einzelnen Inspiration. Ziehen Sie dazu den **Marker** vom Markerfeld auf den Anfang einer normalen Inspiration im Volumenkanal. Bewegen Sie den **Wellenformcursor** zur nächsten Spitze im Volumenkanal (normalerweise 0,5 bis 1,5 s rechts neben dem Marker).
3. Klicken Sie hier, um die markierten Daten in das **Wertefeld** einzufügen, und ziehen Sie den Wert vom Wertefeld in die Zelle „Atemvolumen (V_T)“ der Tabelle. Das exspirierte Minutenvolumen wird von LabTutor berechnet.
4. Wiederholen Sie die Schritte 2 und 3, um das inspiratorische Reservevolumen (IRV) und das exspiratorische Reservevolumen (ERV) zu ermitteln. Beachten Sie, dass der Marker für das ERV-Verfahren am Startpunkt einer normalen Inspiration (Tiefpunkt) bleiben sollte. Für das IRV-Verfahren muss er zum Endpunkt einer normalen Inspiration (Spitze) gezogen werden.
5. Klicken Sie auf diesen Link und ermitteln Sie mit dem Rechner Vorhaltewerte für das Residualvolumen (RV).

Die Lungenkapazitäten werden von LabTutor berechnet.

Übung 2

In dieser Übung messen Sie Parameter der forcierten Exspiration, die zur Analyse der Lungenfunktion verwendet werden.

Sie sollten denselben Probanden verwenden wie in Übung 1.

Vorgehensweise

1. Setzen Sie den Spirometer-Pod über die Schaltfläche **Pod zurücksetzen** wieder auf null zurück. Denken Sie daran, dass der Durchflussmesser auf der Bank beim Zurücksetzen nicht bewegt werden darf.
2. Klicken Sie auf **Starten**. Sobald die Aufzeichnung beginnt, bitten Sie den Probanden, die Nasenklammer wieder aufzusetzen und normal in den Durchflussmesser zu atmen.
3. Bereiten Sie den **Kommentar** „FVC-Verfahren“ vor.
4. Lassen Sie den Probanden 10 bis 20 Sekunden lang normal atmen.
5. Bitten Sie den Probanden, **einzuatmen** und dann so **kräftig**, **vollständig** und **lange** wie möglich **auszuatmen**, bis keine Luft mehr exspiriert werden kann.
6. Klicken Sie im Kommentarfeld auf „Hinzufügen“.
7. Lassen Sie den Probanden wieder normal atmen, und klicken Sie dann auf **Stoppen**.
8. Wiederholen Sie diesen Vorgang noch zweimal, so dass Sie am Ende drei unterschiedliche Aufzeichnungen zur forcierten Vitalkapazität haben.

Analyse

Gehen Sie wie unten beschrieben vor, um die Tabelle zu vervollständigen.

1. Untersuchen Sie - ggf. mithilfe des **Wellenformcursors** und des **Markers** - die einzelnen drei Aufzeichnungen zur forcierten Vitalkapazität (FVC).
2. Ermitteln Sie anhand des Flusskanals, welche der drei Aufzeichnungen einen maximalen exspiratorischen Spitzenfluss (PIF) aufweist.
3. Klicken Sie hier, um diese Daten in das **Wertefeld** zu übertragen. Ziehen Sie den Wert in die entsprechende Zelle der Tabelle.

4. Wiederholen Sie diesen Schritt, um den maximalen exspiratorischen Spitzenfluss (PEF) zu ermitteln, und geben Sie diesen ebenfalls in die Tabelle ein.
5. Ermitteln Sie anhand des Volumenkanals, welche der drei Aufzeichnungen eine maximale FVC aufweist.
6. Platzieren Sie den Marker auf der Spitzeninhalation und den Wellenformcursor auf der maximalen Exspiration im Volumenkanal. Klicken Sie hier, um die markierten Daten in das Wertefeld einzufügen, und ziehen Sie den Wert vom Wertefeld in die Zelle „FVC“ der Tabelle.
7. Messen Sie anhand derselben Aufzeichnung, mit der Sie die maximale FVC ermittelt haben, das forcierte exspiratorische Volumen in 1 Sekunde (FEV_1). Platzieren Sie den Marker auf der Spitzeninhalation im Volumenkanal und den Zeiger auf 1,0 s hinter der Spitze. Klicken Sie hier, um die markierten Daten in das Wertefeld einzufügen, und ziehen Sie den Wert vom Wertefeld in die Zelle „FVC“ der Tabelle.

Das prozentuale Verhältnis zwischen FEV_1 und FVC wird von LabTutor berechnet.

Übung 3

Die Auswirkungen bronchialer Einschränkungen wie Asthma lassen sich durch folgende Änderung am Geräteaufbau demonstrieren.

Aufbau

1. Entfernen Sie den Filteraufsatz von der transparenten Röhre.
2. Verschließen Sie das Ende des Filters mit Klebeband.
3. Bohren Sie mit einem Kugelschreiber oder einem spitzen Bleistift ein Loch von etwa einem halben Zentimeter Durchmesser in das Klebeband über dem Filter.
4. Bringen Sie den Filter wieder an der transparenten Röhre an.

Vorgehensweise

Wiederholen Sie die Schritte in Übung 2 (siehe unten).

1. Setzen Sie den Spirometer-Pod über die Schaltfläche **Pod zurücksetzen** wieder auf null zurück. Denken Sie daran, dass der Durchflussmesser auf der Bank beim Zurücksetzen nicht bewegt werden darf.
2. Klicken Sie auf **Starten**. Sobald die Aufzeichnung beginnt, bitten Sie den Probanden, die Nasenklammer wieder aufzusetzen und normal in den Durchflussmesser zu atmen.
3. Bereiten Sie den **Kommentar** „FVC-Einschränkung“ vor.
4. Lassen Sie den Probanden 10 bis 20 Sekunden lang normal atmen.
5. Bitten Sie den Probanden, **einzuatmen** und dann so **kräftig**, **vollständig** und **lange** wie möglich **auszuatmen**, bis keine Luft mehr exspiriert werden kann.
6. Klicken Sie im Kommentarfeld auf „Hinzufügen“.
7. Lassen Sie den Probanden wieder normal atmen, und klicken Sie dann auf **Stoppen**.
8. Wiederholen Sie diesen Vorgang noch zweimal, so dass Sie am Ende drei unterschiedliche Aufzeichnungen zur forcierten Vitalkapazität haben.

Analyse

Wiederholen Sie die Analyse in Übung 2 (siehe unten).

1. Untersuchen Sie - ggf. mithilfe des **Wellenformcursors** und des **Markers** - die einzelnen drei Aufzeichnungen zur forcierten Vitalkapazität (FVC).
2. Ermitteln Sie anhand des Flusskanals, welche der drei Aufzeichnungen einen maximalen exspiratorischen Spitzenfluss (PIF) aufweist.
3. Klicken Sie hier, um diese Daten in das **Wertefeld** zu übertragen. Ziehen Sie den Wert in die entsprechende Zelle der Tabelle.
4. Wiederholen Sie diesen Schritt, um den maximalen exspiratorischen Spitzenfluss (PEF) zu ermitteln, und geben Sie diesen ebenfalls in die Tabelle ein.
5. Ermitteln Sie anhand des Volumenkanals, welche der drei Aufzeichnungen eine maximale FVC aufweist.
6. Platzieren Sie den Marker auf der Spitzeninhalation und den Wellenformcursor auf der maximalen Exspiration im Volumenkanal. Klicken Sie hier, um die markierten Daten in das Wertefeld einzufügen, und ziehen Sie den Wert vom Wertefeld in die Zelle „FVC“ der Tabelle.
7. Messen Sie anhand derselben Aufzeichnung, mit der Sie die maximale FVC ermittelt haben, das forcierte exspiratorische Volumen in 1 Sekunde (FEV_1). Platzieren Sie den Marker auf der Spitzeninhalation im Volumenkanal und den Zeiger auf 1,0 s hinter der Spitze. Klicken Sie hier, um die markierten Daten in das Wertefeld einzufügen, und ziehen Sie den Wert vom Wertefeld in die Zelle „FVC“ der Tabelle.

Das prozentuale Verhältnis zwischen FEV_1 und FVC wird von LabTutor berechnet.

Übung 4

In dieser Übung vergleichen Sie die Parameter der forcierten Exspiration, die an verschiedenen Probanden gemessen wurden.

Vorgehensweise

Wiederholen Sie die Schritte in Übung 2 (siehe unten) mit bis zu drei weiteren Probanden.

Wichtig: Denken Sie daran, den Einwegfilter und das Mundstück für jeden neuen Probanden auszutauschen.

1. Setzen Sie den Spirometer-Pod über die Schaltfläche **Pod zurücksetzen** wieder auf null zurück. Denken Sie daran, dass der Durchflussmesser auf der Bank beim Zurücksetzen nicht bewegt werden darf.
2. Klicken Sie auf **Starten**. Sobald die Aufzeichnung beginnt, bitten Sie den Probanden, die Nasenklammer wieder aufzusetzen und normal in den Durchflussmesser zu atmen.
3. Bereiten Sie den **Kommentar** „FVC-Proband 2“ vor.
4. Lassen Sie den Probanden 10 bis 20 Sekunden lang normal atmen.
5. Bitten Sie den Probanden, **einzuatmen** und dann so **kräftig**, **vollständig** und **lange** wie möglich **auszuatme**n, bis keine Luft mehr exspiriert werden kann.
6. Klicken Sie im Kommentarfeld auf „Hinzufügen“.
7. Lassen Sie den Probanden wieder normal atmen, und klicken Sie dann auf **Stoppen**.
8. Wiederholen Sie diesen Vorgang noch bis zu zweimal, so dass Sie am Ende drei unterschiedliche Aufzeichnungen zur forcierten Vitalkapazität haben.
9. Wiederholen Sie diese Übung mit bis zu zwei weiteren Probanden.

Analyse

Wiederholen Sie die Analyse in den Übungen 2 und 3 für jeden Probanden (siehe unten).

1. Untersuchen Sie - ggf. mithilfe des **Wellenformcursors** und des **Markers** - die einzelnen drei Aufzeichnungen zur forcierten Vitalkapazität (FVC).
2. Ermitteln Sie anhand des Flusskanals, welche der drei Aufzeichnungen einen maximalen exspiratorischen Spitzenfluss (PIF) aufweist.
3. Klicken Sie hier, um diese Daten in das **Wertefeld** zu übertragen. Ziehen Sie den Wert in die entsprechende Zelle der Tabelle.
4. Wiederholen Sie diesen Schritt, um den maximalen exspiratorischen Spitzenfluss (PEF) zu ermitteln, und geben Sie diesen ebenfalls in die Tabelle ein.
5. Ermitteln Sie anhand des Volumenkanals, welche der drei Aufzeichnungen eine maximale FVC aufweist.
6. Platzieren Sie den Marker auf der Spitzeninhalation und den Wellenformcursor auf der maximalen Exspiration im Volumenkanal. Klicken Sie hier, um die markierten Daten in das Wertefeld einzufügen, und ziehen Sie den Wert vom Wertefeld in die Zelle „FVC“ der Tabelle.
7. Messen Sie anhand derselben Aufzeichnung, mit der Sie die maximale FVC ermittelt haben, das forcierte exspiratorische Volumen in 1 Sekunde (FEV_1). Platzieren Sie den Marker auf der Spitzeninhalation im Volumenkanal und den Zeiger auf 1,0 s hinter der Spitze. Klicken Sie hier, um die markierten Daten in das Wertefeld einzufügen, und ziehen Sie den Wert vom Wertefeld in die Zelle „FVC“ der Tabelle.

Das prozentuale Verhältnis zwischen FEV_1 und FVC wird von LabTutor berechnet.

Atemfluss und -volumen - Bericht

Übung 1: Lungenvolumen und -kapazitäten

Zeigen Sie mithilfe der **Schaltflächen für die horizontale Komprimierung** und der Bildlaufleiste die Daten für Übung 1 an, die in den Bericht aufgenommen werden sollen.

Hinweis: Die Vorhaltewerte basieren auf den Goldman- und Becklake-Gleichungen für die Lungenfunktion (aus dem „John Hopkins Pulmonary Laboratory“).

Studienfragen

1. Kommentieren Sie die Unterschiede zwischen den Experimentier- und Vorhaltewerten für VC, FRC und TLC in der oben stehenden Tabelle. Wodurch können solche Unterschiede ggf. entstehen?
2. Bei ruhiger Atmung werden die Muskeln vorwiegend beim Einatmen beansprucht. Das Ausatmen ist aufgrund der elastischen Rückfederung der Lunge größtenteils ein passiver Vorgang. Können Sie diese Tatsache mit dem exspiratorischen und inspiratorischen Flussmuster in Zusammenhang bringen? Hinweis: Das normale Atmungsmuster ist insofern effizient, dass es nur eine kurzfristige Muskelanstrengung erfordert.
3. Erklären Sie, warum RV nicht durch gewöhnliche Spirometrie ermittelt werden kann?

Übung 2: Lungenfunktionstests

Zeigen Sie mithilfe der Schaltflächen für die horizontale Komprimierung und der Bildlaufleiste die Daten für Übung 2 an, die in den Bericht aufgenommen werden sollen.

Studienfragen

1. Kommentieren Sie die Unterschiede zwischen den Experimentier- und Vorhaltewerten für FVC, FEV_1 und das FEV_1/FVC-Verhältnis in der oben stehenden Tabelle. Wodurch können solche Unterschiede ggf. entstehen?
2. Beschreiben Sie mit eigenen Worten die physiologische Bedeutung des FEV_1/FVC-Verhältnisses.
3. Waren die Ergebnisse für die forcierte Atmung in allen drei Versuchen konsistent? Falls nicht, warum nicht?

Übung 3: Simulation von Atemwegseinschränkungen

Zeigen Sie mithilfe der Schaltflächen für die horizontale Komprimierung und der Bildlaufleiste die Daten für die beiden normalen Lungenfunktionstests (Übung 2) und die Simulation der Atemwegseinschränkung (Übung 3) an, die in den Bericht aufgenommen werden sollen.

Studienfragen

1. Welche Werte wurden angesichts Ihrer Daten durch die simulierte Atemwegseinschränkung beeinflusst und warum?
2. Erklären Sie mit eigenen Worten, welche physiologischen Ereignisse während des simulierten Asthmaanfalls auftraten.
   Hinweis: Denken Sie daran, wie Sie sich dabei gefühlt haben und welche Auswirkungen dies auf ihr allgemeines Wohlbefinden und Ihre Aktivitäten hätte.

Übung 4: Lungenfunktionstests an verschiedenen Probanden

Zeigen Sie mithilfe der Schaltflächen für die horizontale Komprimierung und der Bildlaufleiste die Daten für Übung 4 an, die in den Bericht aufgenommen werden sollen.

Studienfragen

1. Kommentieren Sie den Bereich der Ergebnisse, die in der Tabelle für Übung 4 angezeigt werden.
2. Welche Faktoren könnten Ihrer Meinung nach zu unterschiedlichen Lungenparametern bei den Probanden beitragen?

Quelle: LabTutor-Lehreinheit „Atemfluss und –volumen“ von ADInstruments

NIERE – ELEKTROLYT- UND WASSERHAUSHALT

GK 9.1-9.2

Lehrbücher: Speckmann / Hescheler / Köhling, 5. Aufl., Kap. 9, Kap. 10, Kap. 11
Klinke / Pape / Kurtz / Silbernagl, 6. Aufl., Kap. 9, Kap. 10, Kap. 11
Schmidt / Lang, 30. Aufl., Kap. 29, Kap. 30, Kap. 35

Allgemeines

Körperwasser und Flüssigkeitsräume: Beim Erwachsenen trägt das Gesamtkörperwasser etwa zu 2/3 zum Körpergewicht bei. Das Gesamtkörperwasser verteilt sich auf folgende Flüssigkeitsräume: 60 % Intrazellularraum und 40 % Extrazellularraum. Zum Extrazellularraum zählen

1. die interstitielle Flüssigkeit
2. das Blutplasma
3. das transzelluläre Wasser (liquor cerebrospinalis, Augenkammerwasser, Flüssigkeit im Magen/Darm-Trakt, in Drüsen, in Nierentubuli und in ableitenden Harnwegen)

Ein Erwachsener mit 70 kg Körpergewicht verfügt somit: über ca. 42 l Gesamtkörperwasser (25 l intrazellulär und 17 l extrazellulär, wovon 13 l interstitiell, 3 l im Plasma und 1 l transzellulär gefunden werden).

Aufgaben der Nieren

1. Isovolämie: Konstanterhaltung des Extrazellularvolumens
2. Isotonie: Konstanterhaltung der Osmolalität der Extrazellularflüssigkeit
3. Isoionie: Konstanterhaltung der ionalen Zusammensetzung der Extrazellularflüssigkeit; Regulation des Elektrolythaushalts
4. Isohydrie: Konstanterhaltung des pH-Wertes der Extrazellularflüssigkeit; Regulation des Säure-Basen-Haushalts
5. Ausscheidung harnpflichtiger Stoffwechselendprodukte (Harnstoff, Harnsäure, Kreatinin, NH_4^+, Phosphat und Sulfat; Ausscheidung von Fremdstoffen
   Synthese von Hormonen: Erythropoietin, Vitamin D3, Freisetzung von Renin und Prostaglandin
6. Stoffwechselleistung: Glukoneogenese, Ammoniakbildung und Laktatutilisation

Die Nieren werden mit rund 20 % des Herzzeitvolumens stark durchblutet, der renale Plasmafluss *(RPF)* beträgt etwa 600 ml/min, der renale Blutfluss *(RBF)* etwa 1100 ml/min.

Eine wichtige Größe zur Beurteilung der Nierenfunktion ist die glomeruläre Filtrationsrate *(GFR)*, d. h. das pro Zeiteinheit in beiden Nieren aus dem Blutplasma abgepresste Volumen an Ultrafiltrat. Die GFR kann nicht direkt bestimmt werden, sondern indirekt mit Hilfe im Plasma gelöster Stoffe, die zu diesem Zweck folgende Eigenschaften besitzen müssen:

- Sie müssen frei filtrierbar sein, d. h. die glomeruläre Filtrationsbarriere ungehindert passieren und ihre Konzentration im Ultrafiltrat gleich hoch derjenigen im Plasma sein.
- Auf ihrem Weg durch den tubulären Apparat dürfen sie weder resorbiert, sezerniert oder metabolisiert werden.

Sind diese Kriterien erfüllt, dann ist die Menge des ausgeschiedenen Stoffes im Urin gleich der im selben Zeitraum filtrierten Menge (Menge = Konzentration · Volumen). Diese Voraussetzungen sind mit ausreichender Genauigkeit für das Inulin, ein linear aufgebautes Polysaccharid (Molekulargewicht ca. 5500 Da) sowie für das endogene Kreatinin (Molekulargewicht ca. 113 Da) gegeben. Bestimmt man mit Hilfe dieser Substanzen die GFR des Menschen, beträgt diese etwa 120 ml/min.

(Formel GFR = $\dot{V} \cdot U_S : P_S$ (ml/min)

($\dot{V}$: Harnzeitvolumen; U_S: Konzentration einer Substanz im Urin; P_S: Konzentration derselben Substanz im Plasma)

Der Quotient aus der glomerulären Filtrationsrate (GFR) und dem renalen Plasmafluss (RPF) ergibt die Filtrationsfraktion (FF). Normalwert für die Filtrationsfraktion ist etwa 0,2, d.h. 20 % des in die Glomerula einströmenden Blutplasmas wird als Ultrafiltrat abgepresst.

Den Glomerula ist der tubuläre Apparat nachgeschaltet, indem durch spezifische Transport- und Metabolisierungsprozesse (Resorption, Sekretion, Katabolismus, Anabolismus, Gegenstromkonzentrierung) der Endharn aufbereitet wird. Der Hauptteil aller filtrierten Substanzen wird im proximalen Tubulus resorbiert (ungefähr 60 %). Funktionell und quantitativ ist dabei die Na-Resorption von großer Bedeutung; sie bestimmt maßgeblich den Sauerstoffverbrauch der Nieren. Dem osmotischen Gefälle folgend wird mit NaCl Wasser reabsorbiert. Im distalen Tubulus und Sammelrohr geschieht die Feineinstellung der Urinzusammensetzung, allerdings wird hier nur noch 10 – 15 % der Salz- und Wasserausscheidung reguliert.

In diesem Praktikum soll die Antwort der Niere auf eine hypotone Volumen- und eine isotone Kochsalzbelastung beobachtet werden. Die Zufuhr von Wasser oder die Aufnahme von Kochsalz über den Bedarf hinaus bewirkt eine Funktionsänderung der Niere mit dem Ziel, den Wassergehalt und die ionale Zusammensetzung der extrazellulären Körperflüssigkeit konstant zu halten. Außerdem soll die Verdünnungs- und Konzentrierfähigkeit der Niere untersucht werden. Am Beispiel von Glukose soll untersucht werden, wie die Niere an der Regulation der Plasmakonzentration bestimmter Substanzen beteiligt ist.

Verzeichnis der Aufgaben

Versuche

1. Trinken von 1 l Wasser: hypotone Hyperhydratation
2. Trinken von 1 l isotonischer Kochsalzlösung: isotone Hyperhydratation
3. Trinken von 1 l isotonischem Sportgetränk = Isofruit
4. Dursten über wenigstens 6 Stunden pro Hydratation: Konzentrierungsversuch nach Volhard

Messungen

1. Bestimmung der Verdünnungs- bzw. Konzentrierfähigkeit der Niere mit Hilfe der Bestimmung des spezifischen Uringewichts
2. Bestimmung der GFR mit Hilfe der endogenen Kreatinin-Clearance (Jaffe-Reaktion)
3. Bestimmung der Natrium-Kalium-Konzentration im Urin bzw. Plasma
4. Bestimmung der Glukosekonzentration im Blut des Wassertrinkers und des Isofruittrinkers
5. Bestimmung der Glukosekonzentration im Urin des Wassertrinkers und des Isofruittrinkers

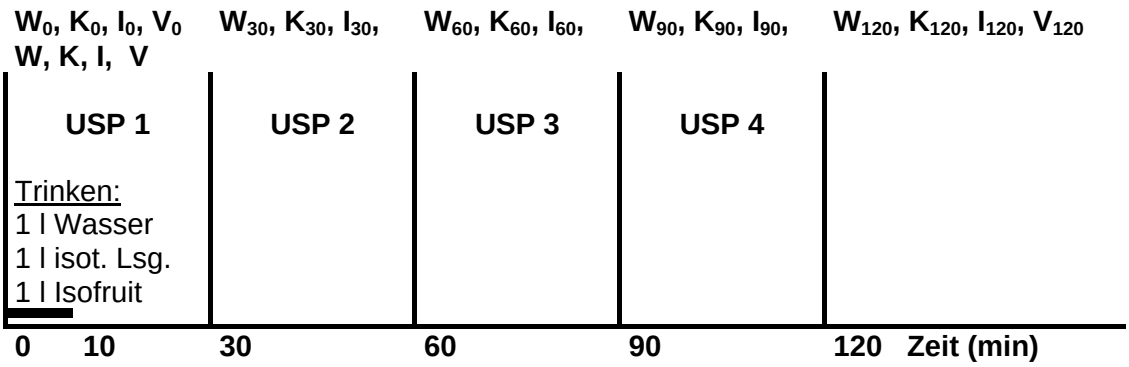
Versuchsplan

Jede Gruppe stellt 4 Versuchspersonen. Urin- und Plasmaproben von diesen Versuchspersonen werden wie folgt abgekürzt bezeichnet:

Wassertrinker: "W"
Kochsalztrinker: "K"
Isofruittrinker: “I “
Konzentrierer (Volhard-Versuch): "V"

Die Wasser-, Kochsalzlösung- und Isofruittrinker (Versuch 1 "W", 2 "K" und 3 "I ") sollten sich in den letzten 24 Stunden vor dem Versuch hinsichtlich Salz- und Trinkmengen normal ernährt haben. Der Konzentrierer (Versuch 4 "V") sollte am Tage des Praktikums keine Flüssigkeit, sondern nur noch Trockenkost zu sich genommen haben. Alle Versuchspersonen müssen den Zeitpunkt der letzten Blasenentleerung vor Praktikumsbeginn notieren.

Zeitplan


Urin: W0, K0, I0, V0 W30, K30, I30, W60, K60, I60, W90, K90, I90, W120, K120, I120, V120
Plasma: W, K, I, V
USP 1
USP 2
USP 3
USP 4
Trinken:
1 l Wasser
1 l isot. Lsg.
1 l Isofruit
0 10 30 60 90 120 Zeit (min)

(USP = Urinsammelperiode)

Gemäß dem oben stehenden Schema werden die Urinproben wie folgt bezeichnet:

Urin W_0, W_{30}, W_{60}, W_{90}, W_{120}:	Versuchsperson 1: "W" (Trinken von 1l Wasser)
Urin K_0, K_{30}, K_{60}, K_{90}, K_{120}:	Versuchsperson 2: "K" (Trinken von 1l isotonischer Kochsalzlösung)
Urin I_0, I_{30}, I_{60}, I_{90}, I_{120}:	Versuchsperson 3: "I" (Trinken von 1l Isofruit)
Urin V_0, V_{120}:	Versuchsperson4: "V" (VOLHARD-Versuch / Konzentrierer)

Gleich zu Beginn des Praktikums müssen die Versuchspersonen ihre Blasen entleeren.

Anschließend wird allen Versuchspersonen 10 ml Venenblut entnommen, aus denen die Plasmaproben W, K, I und V gewonnen werden. Wassertrinker und Isofruittrinker bestimmen den Blutzuckerspiegel zum Zeitpunkt T0.

Danach trinken die Versuchspersonen aus jeder Gruppe je 1l Wasser ("W") , 1l physiologische Kochsalzlösung ("K") bzw 1l Isofruit ("I"). Der *Zeitpunkt des Trinkbeginns ist in Tabelle 5.1 zu notieren* (der 1. Schluck entspricht dem Zeitpunkt 0 Minuten des Zeitplanes!). *Trinkperiode nicht länger als 10 Minuten!*

Ab diesem Zeitpunkt soll von den Versuchspersonen alle 30 min Urin gesammelt werden. Eine Ausnahme bildet der Konzentrierer "V", der lediglich am Anfang und am Ende des Zeitplanes jeweils eine Urinprobe gewinnt (Urin V_0,V_{120}).

Zunächst muss von *allen* Urinproben das genaue *Volumen* mittels Standzylinder ermittelt werden. Gleichzeitig kann in den Standzylindern auch das *spezifische Gewicht* der Urinproben gemessen werden. Bei Wassertrinker und Isofruittrinker wird zu allen Zeitpunkten zusätzlich die Glukosekonzentration im Urin und im Blut bestimmt.

Nach Bestimmung von Volumen und Dichte sowie Eintragung der Werte in Tabelle 5.2 ist mit den Proben folgendermaßen zu verfahren:

- Von den **Proben zu den Zeitpunkten 0 und 60 Minuten** (W_0, W_{60}, K_0, K_{60}, I_0, I_{60}, V_0) ist für die weitere Analytik (Kreatinin-, Na^+/K^+-Bestimmung) jeweils das Volumen eines Reagenzglases **aufzubewahren**. Bitte beschriften Sie die Reagenzgläser entsprechend!
- Die Proben zu den Zeitpunkten 30, 90 und 120 Minuten können nach Volumen-, Dichte und Glukosebestimmung gänzlich verworfen werden.

Analytik und Auswertung

Sobald die Urinproben W_0, W_{60}, K_0, K_{60}, I_0, I_{60} und V_0 sowie die Plasmaproben W, K, I und V gewonnen worden sind, kann parallel zur Volumendichtebestimmung mit der weiteren Analytik (Kreatininkonzentrationsbestimmung) begonnen werden.

Messung 1: Bestimmung der renalen Verdünnungs- bzw. Konzentrierfähigkeit

Die Nieren sind in der Lage, einen gegenüber dem Plasma verdünnten oder konzentrierten Urin zu produzieren. Diese renale Funktionsanpassung ermöglicht Extremwerte des spezifischen Uringewichts zwischen 1,003 g/cm^3 (hypotoner Urin) und 1,040 g/cm^3 (hypertoner Urin). Im Konzentrierungsversuch nach Volhard wird diese Funktion getestet. Alternativ zu dem für die Patienten sehr belastenden Konzentrierungs- bzw. Durstversuch wird in der klinischen Praxis die Konzentrierfähigkeit der Niere durch die Injektion von Adiuretin (ADH, Vasopressin) sehr schnell und exakt bestimmt.

Messmethode und Durchführung

Die osmotische Konzentration des Urins wird meist indirekt durch Messung des spezifischen Gewichts mit einem geeichten Urometer bestimmt. Es muss erschütterungs- und berührungsfrei in der schaumfreien Urinprobe schwimmen. Das spezifische Gewicht kann an der Skaleneinteilung in Höhe des unteren Meniskus direkt in g/cm^3 abgelesen werden. Eine Temperaturkorrektur kann im Rahmen des Praktikums vernachlässigt werden; sonst sind je 3° C Abweichung der Urintemperatur über bzw. der Eichtemperatur der Spindel 0,01 Skalenteile zu addieren bzw. zu subtrahieren. Die abgelesenen Werte bitte in Tab. 6.2 eintragen.

Tabelle 5.1

	"W"	"K"	„I“
Trinkbeginn			

Tabelle 5.2

Urinprobe	W					K					I					V	
	0	30	60	90	120	0	30	60	90	120	0	30	60	90	120	0	120
Zeit nach Trinkbeginn [min]	–					–					–					–	
Spezifisches Gewicht [g/cm³]																	
Urinvolumen [ml]																	
Urinsammelperiode [min]																	
UMV [ml/min]																	

Messung 2: Bestimmung der GFR

Die in der Einleitung aufgeführten idealen Forderungen nach einem Stoff zur Bestimmung der GFR erfüllt das Inulin. Inulin muss jedoch als körperfremde Substanz erst durch intravenöse Injektion zugeführt werden und dann über längere Zeit eine konstante Plasmakonzentration aufrechterhalten werden. Alternativ kann auch das Kreatinin, das im Körper in Abhängigkeit von der funktionierenden Muskelmasse gebildet wird, zurückgegriffen werden. Kreatinin erfüllt die Bedingungen eines Teststoffs zur GFR-Bestimmung allerdings nur annähernd ideal, da es in geringem Maße neben der glomerulären Filtration auch tubulär sezerniert wird. Allerdings wird die leicht zu hohe Konzentration im Urin ausgeglichen durch eine im Regelfall auch etwas zu hohe Plasma-Kreatinin-Konzentrationsbestimmung (Erfassung von Pseudokreatinin-Verbindungen, nicht-filtrierbare Plasma-Chromogene). Letztlich führen beide Messungenauigkeiten in Bezug auf das Verhältnis Urin/Plasma-Kreatinin zu einem Wert, der weitgehend dem realen Verhältnis entspricht. Deshalb ist die Bestimmung der Kreatinin-GFR als gutes Maß für die wahre GFR anzusehen.

Messmethode

Zur Berechnung der Kreatinin-Clearance benötigt man die Kreatinin-Konzentration im Plasma und im Urin, außerdem das Urinminutenvolumen (UMV). Kreatinin bildet in alkalischer Lösung mit Pikrinsäure einen roten 1/1-Farbkomplex, dessen Menge der Kreatinin-Konzentration proportional ist und bei der Wellenlänge von 546 nm photometrisch gemessen werden kann. Die abgelesenen Werte bitte in Tab. 6.3 (Plasma) und Tab. 6.4 (Urin) eintragen.

Durchführung

Urin-Vorverdünnung: Da die Kreatinin-Konzentration im Urin sehr hoch sein kann, muss der Urin für eine photometrische Kreatinin-Bestimmung nach folgendem Schema vorverdünnt werden:

UMV (ml/min)	Verdünnung
0,0 - 1,0	1 : 25
1,0 - 3,0	1 : 10
3,0 - 6,0	1 : 5
6,0 - ∞	1 : 2

(UMV = Urinminutenvolumen)

Bitte beachten Sie: Für die Bestimmung der Na^+/K^+-Konzentration (Pathophysiologie) ist ferner ein unverdünnter Anteil der Urinproben W_0, K_0, V_0 aufzubewahren.

Protein-Fällung: Da die lichtstreuenden Eiweißkörper die photometrische Messung stören würden (TYNDALL-Effekt), müssen diese aus dem Plasma zunächst entfernt werden. Sie werden mit Trichloressigsäure (TCA) gefällt. Nach der Blutentnahme werden die Monovetten 5 min bei 6000 rpm zentrifugiert. 2 ml Plasma werden anschließend mit 2 ml TCA gemischt, die Proben kräftig geschüttelt und noch mal 5 min zentrifugiert. Der klare Überstand wird in ein neues Reagenzglas gefüllt.

Farbreaktion: Die Komplexbildung von Pikrinsäure und Kreatinin ist temperatur- und zeitabhängig. Sie sollte deshalb in allen Proben gleichzeitig gestartet werden. Nach Zugabe der Reaktionslösung werden die Proben 25 min bei Raumtemperatur inkubiert und dann bei 546 nm photometrisch gegen den Leerwert gemessen.

Pipettierschema:

	Leerwert	**Standard**	**Plasmaprobe**	**Urinprobe**
a.dest.	**0,5 ml**	**---**	**---**	**---**
Kreatinin-Standard (2mg/dl)	**---**	**0,5 ml**	**---**	**---**
TCA	**0,5 ml**	**0,5 ml**	**---**	**0,5 ml**
Plasmaüberstand	**---**	**---**	**1 ml**	**---**
Verdünnter Urin	**---**	**---**	**---**	**0,5 ml**
Reaktionslösung	**1 ml**	**1 ml**	**1 ml**	**1 ml**

Berechnung: Aus dem Verhältnis der Extinktion der Probe zur Extinktion des Standards kann direkt die Kreatinin-Konzentration im Plasma bzw. im Urin berechnet werden.

$$\text{Plasma}_{\text{Kreatinin}}\ (\text{mg/dl}) = \frac{2 \times \text{Extinktion der Probe}}{\text{Extinktion des Standards}}$$

$$\text{Urin}_{\text{Kreatinin}}(\text{mg/dl}) = \frac{2 \times \text{Verdünnungsfaktor} \times \text{Extinktion der Probe}}{\text{Extinktion des Standards}}$$

Die GFR berechnet sich dann aus:

$$GFR = UMV\ [ml/min] \times \frac{Urin_{Kreatinin}\ [mg/dl]}{Plasma_{Kreatinin}\ [mg/dl]}$$

Tragen Sie die gemessenen bzw. berechneten Werte in die Tabellen 5.3 und 5.4 ein.

Tabelle 5.3

Plasmaprobe	W	K	I	V
$E_{Krea(Plasma)}$				
$Plasma_{Kreatinin}$ [mg/dl]				

Tabelle 5.4

Urinprobe	W_0	W_{60}	K_0	K_{60}	I_0	I_{60}	V_0
UMV [ml/min]							
Verdünnungsfaktor							
$E_{Krea(Urin)}$							
$Urin_{Kreatinin}$ [mg/dl]							
GFR [ml/min]							

Messung 3: Bestimmung der Natrium- bzw. Kalium-Clearance

Die Isoionie, die Aufgabe der Niere, die Elektrolyte in engen Grenzen konstant zu halten, wird besonders am Beispiel der Natrium- und Kalium-Ionen deutlich. Bei einem täglichen Filtrationsvolumen von 180 l Primärharn (glomeruläre Filtrationsrate 120 ml/min · 60 · 24) wird etwa 1,5 kg NaCl/Tag filtriert. Das bedeutet, dass zumindestens theoretisch 6 – 8-mal der gesamte Kochsalzbestand des Menschen pro Tag der Kontrolle der Niere unterzogen wird. Von den filtrierten 180 l Primärharn werden jedoch nur ca. 1 % als Urin ausgeschieden, in dem sich ca. 10 g Kochsalz pro Tag befinden. Die enge Kontrolle der Regulation der NaCl-Ausscheidung unterliegt mindestens 3 Hormonen: ADH (antidiuretisches Hormon), dem Renin-Angiotensin-Aldosteronsystem, und dem ANP (atriales natriuretisches Peptid). Eine Störung des Natrium-Haushaltes bedeutet in der Regel gleichzeitig eine Veränderung des Extrazellullärvolumens und damit des Körperwasservolumens. Der größte Teil des Natriums befindet sich im Extrazellularraum und stellt dort mit 94 % der Kationen das wichtigste osmotisch wirksame Ion dar.

Von besonderer klinischer Wichtigkeit ist der Kalium-Plasmaspiegel. Obwohl nur 2 % des Gesamtkörper-Kaliums im Extrazellularraum zu finden sind, wird auch der Kaliumhaushalt über das Plasmakalium reguliert. Die renale K^+-Resorption kann bei niedriger K^+-Zufuhr auf 97 % der filtrierten Kaliummenge gesteigert werden. Andererseits kann Kalium bei extrem K^+-reicher Ernährung (z. B. Vegetarier) zusätzlich zur Filtration im distalen Tubulus sezerniert werden, so dass die ausgeschiedene K^+-Menge bis zu 150 % der filtrierten Menge betragen kann. Störungen der Plasma-Kalium-Konzentration (Normalwert: 3,6 – 5,0 mmol/l) führen durch Einfluss auf das Ruhepotential und die neuromuskuläre Erregbarkeit (siehe Nerv- und Herzpraktikum) zu ubiquitären und schnell lebensbedrohlichen Störungen des Gesamtorganismus.

Messmethode

Die Na^+- und K^+- Konzentrationen werden mit einem automatischen Blutgas-Analysegerät (ABL 660) in der Abteilung für Pathophysiologie bestimmt.

Durchführung

Für die Messungen füllen Sie jeweils 500 µl der **nicht-TCA-behandelten Plasmaprobe** in ein 1,5 ml Reaktionsgefäß. Die Urinproben müssen verdünnt werden: Mischen Sie 300 µl der **unverdünnten Urinprobe** mit 600 µl Urinverdünnungsreagenz in einem 1,5 ml Reaktionsgefäß.

Bitte tragen Sie die Messwerte in die Tabellen 5.5 und 5.6 ein.

Berechnungen

Berechnen Sie nach untenstehenden Formeln

- die filtrierte Na^+- und K^+-Menge,
- die resorbierte Na^+- und K^+-Menge und die
- prozentuale Na^+- und K^+-Nettoresorption.

Bitte tragen Sie die Werte in Tabelle 5.5 ein.

filtrierte Menge: $X_f = 0{,}95 \cdot [X]_P \cdot GFR$
ausgeschiedene Menge: $X_a = [X]_U \cdot UMV$
resorbierte Menge: $X_r = X_f - X_a$

$$\text{prozentuale Nettoresorption} = \left[1-\left(\frac{[X]_U \bullet [Krea]_P}{0{,}95 \bullet [X]_P \bullet [Krea]_U}\right)\right] \cdot 100\ [\%] = \frac{X_f - X_a}{X_f} \cdot 100\ [\%]$$

Tabelle 5.5

Urinprobe	W_0	W_{60}	K_0	K_{60}	I_0	I_{60}	V_0
UMV [ml/min]							
$[Na^+]_U$ [mmol/l]							
$[K^+]_U$ [mmol/l]							
Na^+_f [mmol/min]							
Na^+_a [mmol/min]							
Na^+_r [mmol/min]							
prozentuale Na^+-Nettoresorption [%]							
K^+_f [mmol/min]							
K^+_a [mmol/min]							
K^+_r [mmol/min]							
prozentuale K^+ -Nettoresorption [%]							

Tabelle 5.6

Plasmaprobe	W	K	I	V
$[Na^+]_P$ [mmol/l]				
$[K^+]_P$ [mmol/l]				

Messung 4: Bestimmung der fraktionellen Wasserresorption

Entwicklungsgeschichtlich betrachtet ist die Niere (wahrscheinlich) in erster Linie ein Volumenregulationsorgan, während alle weiteren renalen Funktionen erst sekundär erworben wurden. Auf der anderen Seite ist die Volumenregulation – wie bereits ausgeführt – eng verknüpft mit dem Elektrolythaushalt, da der osmotische Druck der Körperflüssigkeiten für die vitalen Prozesse von zentraler Bedeutung ist. Der Einfluss des Trinkens von weitgehend elektrolytfreiem Wasser einerseits und von physiologischer Kochsalzlösung andererseits auf die Höhe der GFR und auf die Wasserresorption soll daher über wenigstens 2 Stunden nach Trinkbeginn beobachtet werden. Zur graphischen Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Diurese genügt es, wenn Sie das Urinminutenvolumen über 2 Stunden in Abständen von 30 Minuten nach Trinkbeginn bestimmen. Die Urinminutenvolumina sowie die entsprechenden GFR-Werte lassen sich der Tabelle 5.4 entnehmen. Die prozentuale (fraktionelle) Wasserresorption lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$fraktionelle\ Wasserresorption = \left[1 - \left(\frac{UMV}{GFR}\right)\right] \cdot 100\ [\%]$$

Bitte tragen Sie Ihre Ergebnisse in das Koordinatensystem und in Tabelle 5.7 ein.

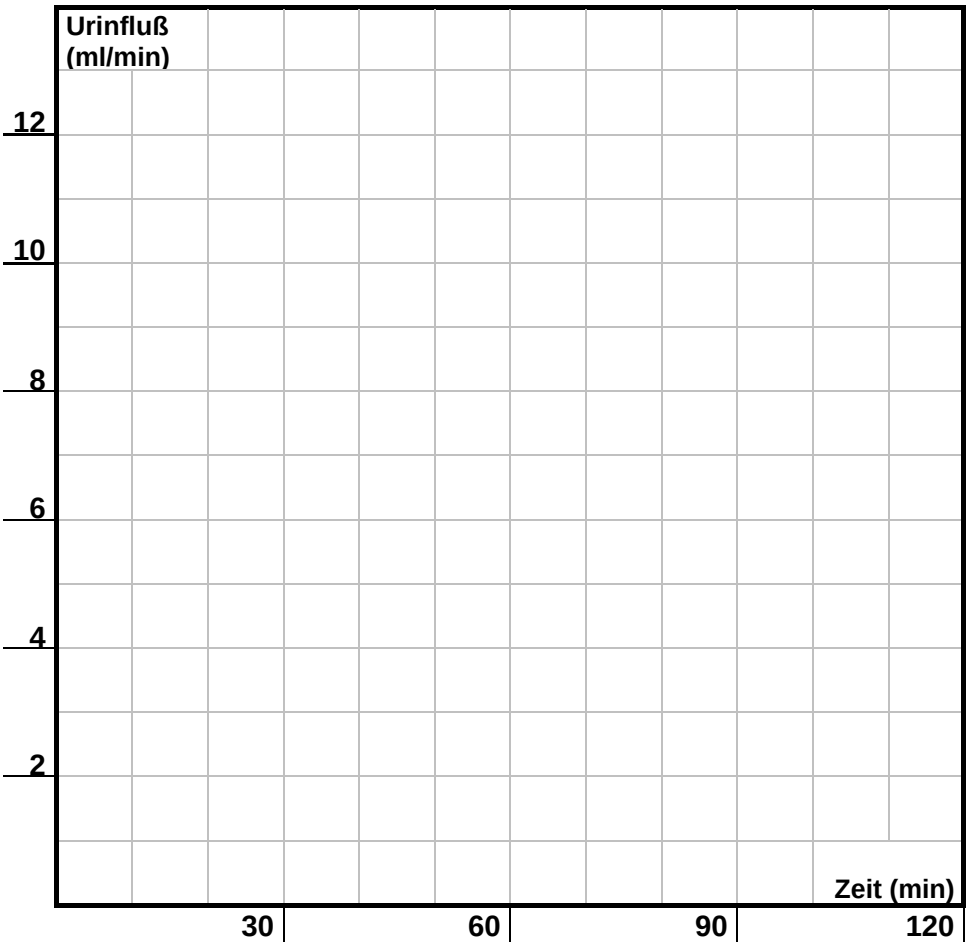


Tabelle 5.7

Urinprobe	W					K					I					V	
	0	30	60	90	120	0	30	60	90	120	0	30	60	90	120	0	120
UMV [ml/min]																	
GFR [ml/min]																	
frakt.Wasser-resorption [%]																	

Messung 5: Bestimmung der Glukosekonzentration im Blut des Wassertrinkers und des Isofruittrinkers

Die Glukosekonzentration im Plasma (nüchtern) liegt zwischen 3,5 - 5,5 mmol/l (60 - 100 mg/dl). Glukose ist frei filtrierbar, wird aber im proximalen Tubulus fast vollständig zurückresorbiert, so dass der Urin normalerweise glukosefrei ist. Das Transportmaximum für Glukose liegt zwischen 1,7 und 2,0 mmol/min (300 - 375 mg/min). Steigt die Glukosekonzentration im Plasma jedoch so stark an, dass die maximale Resorptionsleistung überschritten wird, kommt es zu einer Glukoseausscheidung im Urin (Glukosurie). Die Schwellenkonzentration, bei deren Überschreiten Glukose im Urin ausgeschieden wird, ist etwa doppelt so groß wie die normale Plasmakonzentration bei Nüchternheit (ca. 10 - 11 mmol/l; 180 - 200 mg/dl).

Messmethode

Etwa 2/3 der Glukose liegt im Plasma gebunden an Proteine vor. Im eiweißfreien Plasma, z.B. nach Fällung der Proteine durch TCA, würde die proteingebundene Glukose nicht erfasst.

Zur Bestimmung des Blutzuckers mit modernen Blutzuckermessgeräten werden nur noch ganz geringe Mengen Blut benötigt. Ein Teststreifen, auf dem sich ein Tropfen Blut befindet, wird innerhalb des Gerätes zwischen zwei Elektroden eingebracht und der Stromfluss zwischen diesen Elektroden bei vorgegebener Spannung gemessen. Aus der registrierten Stromstärke wird dann die Glukosekonzentration berechnet.

Durchführung

Befolgen Sie bitte die ausführliche Anleitung zur Blutentnahme und zur Blutzuckermessung, die im Praktikumsraum ausgehängt ist.

Die Ergebnisse der Glukosebestimmung im Blut werden in Tabelle 5.8 eingetragen.

Tabelle 5.8

	Glukosekonzentration im Blut [mg/dl]				
Zeit	T_0	T_{30}	T_{60}	T_{90}	T_{120}
Wassertrinker					
Isofruittrinker					

Messung 6: Bestimmung der Glukosekonzentration im Urin des Wassertrinkers und des Isofruittrinkers

Messmethode

Die Bestimmung der Glukosekonzentration im Urin mit dem Diabur Test 5000 beruht auf einer spezifischen Reaktion von Glukoseoxidase mit Peroxidase. D-Glukose wird in Gegenwart von Wasser und Sauerstoff mit Hilfe von Glukoseoxidase zu D-Glukonolacton oxidiert. Das dabei entstehende Wasserstoffperoxid oxidiert anschließend in Anwesenheit von Peroxidase den Indikator der Teststreifen, der dadurch seine Farbe ändert. Der Test reagiert spezifisch auf Glukose, andere Zucker werden nicht erfasst.

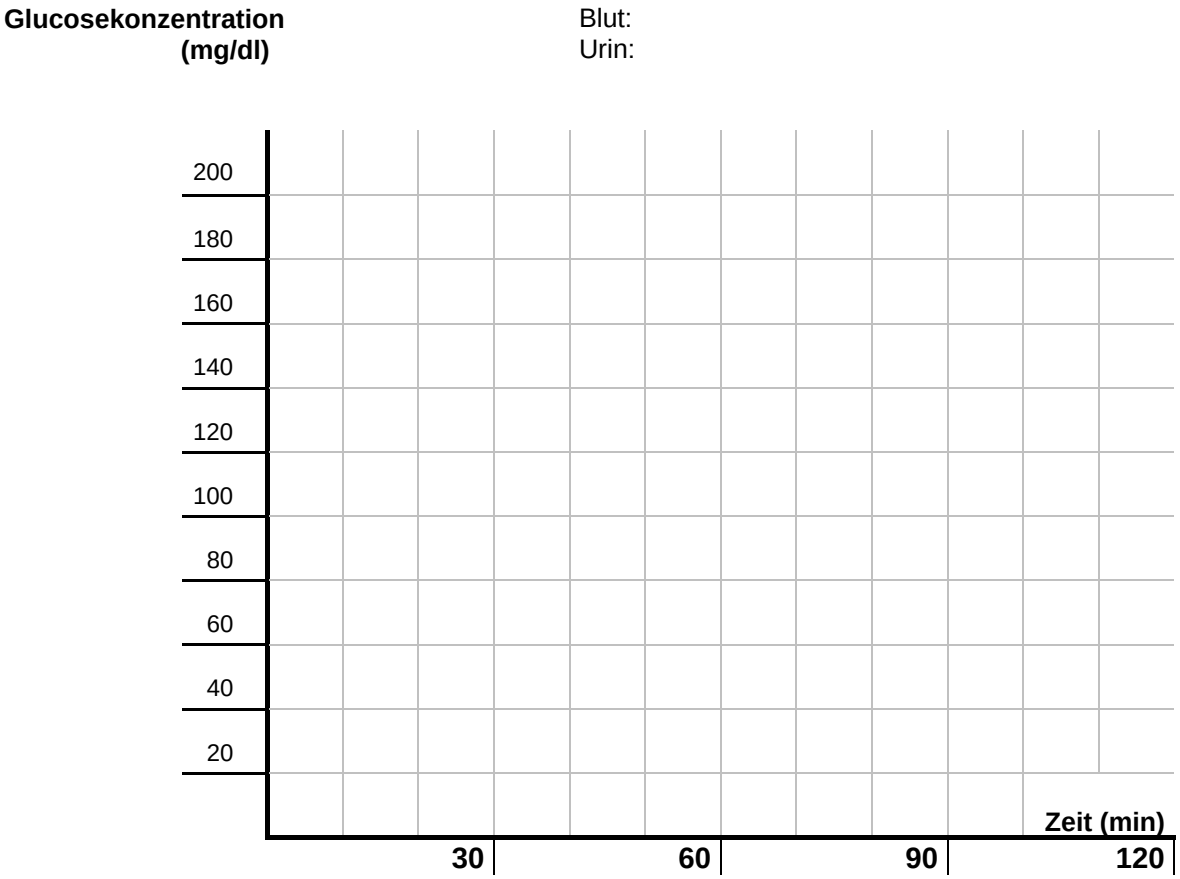
Durchführung

Teststreifen kurz (maximal 1 Sekunde) in den Urin eintauchen. Nach 2 Minuten Farbumschlag mit der Farbskala auf dem Packungsetikett vergleichen. Die Ergebnisse der Glukosebestimmung im Urin werden in Tabelle 5.9 eingetragen.

Tabelle 5.9

	Glukosekonzentration im Urin [mg/dl]				
Zeit	T_0	T_{30}	T_{60}	T_{90}	T_{120}
Wassertrinker					
Isofruittrinker					

Bitte tragen Sie die Ergebnisse der Glukosebestimmung im Blut und im Urin gegen die Zeit auf:



Platz für Notizen

Säure-Basen-Haushalt

Voraussetzungen

Kenntnisse über die wichtigsten Puffereigenschaften des Blutes und pH-regulierende Mechanismen. Kenntnisse der Parameter, anhand derer sich der Säure-Basen-Status des Blutes beurteilen lässt wie pH-Wert, P_{CO_2}-Wert, Standardbicarbonat, Basenüberschuss. Kenntnisse der respiratorisch bzw. nichtrespiratorisch (metabolisch) bedingten Abweichungen im Säure-Basen-Status und der Kompensationsmechanismen.

Einfluss der Ventilation auf den Säure-Basen-Status des Blutes

Mit Hilfe der Astrup-Methode lässt sich aus dem aktuellen pH-Wert und zwei pH-/P_{CO_2}-Wertepaaren der aktuelle P_{CO_2} im Patientenblut ermitteln. Dazu wird im Patientenblut 1. der aktuelle pH-Wert und 2. der pH-Wert nach Äquilibrieren des Blutes mit zwei Gasen von bekannter CO_2-Konzentration bestimmt. Die Wertepaare werden in das Siggaard-Andersen-Diagramm (Abb. 5.1) eingetragen. Durch Interpolation kann der aktuelle P_{CO_2} für den aktuellen pH-Wert ermittelt werden. Die Steilheit der Geraden im Siggaard-Andersen-Diagramm ist abhängig von der Pufferkapazität des Blutes.

Fallbeispiel 1: Einfluss der Ventilation auf den SBH

Die willkürliche Veränderung der Ventilation führt zu Änderungen im SBH. Tragen Sie die zu erwartenden Veränderungen der Blutparameter gegenüber den Normwerten mit Pfeilen (↑ ↓) in Tabelle 5.10 ein.

Tabelle 5.10: Einfluss der Ventilation auf den SBH

	pH	pCO_2 [mmHg]	BE [mmol/l]	Aktuelles HCO_3^- [mmol/l]	Beurteilung
Normo-Ventilation					
Hypo-Ventilation					
Hyper-Ventilation					

Renale Regulation des Säure-Basen-Haushalts

Die Ausscheidung von Säuren und Basen ergibt sich aus der Bicarbonatfiltration im Glomerulus und H^+-Sekretion im Tubulus. Metabolische Störungen sind durch Änderungen der Bicarbonatkonzentration und damit der Bicarbonatfiltration im Glomerulus gekennzeichnet. Bei metabolischer Alkalose ist die Bicarbonatfiltration erhöht und es folgt automatisch eine erhöhte Bicarbonatausscheidung, welche die metabolische Störung kompensiert. Bei metabolischer Azidose ist die Bicarbonatkonzentration und damit die Bicarbonatfiltration gesenkt; es erfolgt automatisch eine höhere Säureausscheidung, welche die metabolische Azidose korrigiert.

Versuch zu Fallbeispiel 2: Ausscheidung überschüssiger Basen durch die Niere

Ein Proband entleert die Blase zur Gewinnung der Ausgangswerte im Urin (Proband soll nicht am Trinkversuch für den Praktikumsabschnitt Niere teilgenommen haben). Die Versuchsperson trinkt dann 0,5 l

einer Bicarbonatlösung (10 g/l). Die Versuchsperson entleert nach 1 und 2 h wiederum die Blase zur Bestimmung des pH-Wertes im Einstunden- bzw. Zweistunden-Urin. Tragen Sie die im Urin gemessenen pH-Werte und die zu erwartenden Blutparameter in Tabelle 5.11 ein.

Tabelle 5.11: Änderung des SBH nach oraler Bikarbonatbelastung

	Urin	Blut				
	pH	pH	PCO_2 [mmHg]	BE [mmol/l]	Aktuelles HCO_3^- [mmol/l]	Beurteilung
Vor Trinken						
Nach 1 Stunde						
Nach 2 Stunden						

Einfluss von schwerer körperlicher Arbeit auf den SBH

Veränderung der Blutparameter im Verlauf einer metabolischen Azidose

Dem vermehrten Anfall von Säuren oder Basen im Blut wird durch die Puffersysteme des Blutes (Bicarbonat, Hämoglobin, Plasmaproteine und Phosphate) durch Assoziation oder Dissoziation von H^+-Ionen einer pH-Änderung entgegengewirkt. Von besonderer Bedeutung ist dabei die alveoläre CO_2-Abatmung und die renale Ausscheidung von Bicarbonat, beides Komponenten des Kohlensäurebicarbonatpuffers. Das Verhältnis der Bicarbonatkonzentration zum P_{CO_2} bestimmt nach der Gleichung von Henderson und Hasselbalch (siehe Lehrbücher der Physiologie) den pH-Wert des Blutes. Unter Normalbedingungen gilt für den Bicarbonatpuffer:

pK-Wert = 6,1; $[HCO_3^-]$ = 24 mmol/l; P_{CO_2} = 40 mmHg;
Löslichkeitskoeffizient α für CO_2 = 0,03 mmol $\cdot$ l^{-1} $\cdot$ $mmHg^{-1}$

Fallbeispiel 3: Durch körperliche Arbeit kann die Milchsäurekonzentration im Blut erhöht werden. Der entstehenden metabolischen Azidose wird als Kompensation eine vermehrte Atmung entgegengestellt. Es entsteht eine Ventilationssteigerung, die einen Abfall der arteriellen P_{CO_2}-Konzentration bewirkt. Durch diese pH-Änderung wird der Effekt der fixen Säure respiratorisch teilweise kompensiert. Tragen Sie die zu erwartenden Veränderungen der Blutparameter in Tabelle 5.12 ein.

Tabelle 5.12: Änderungen des SBH bei körperlicher Belastung

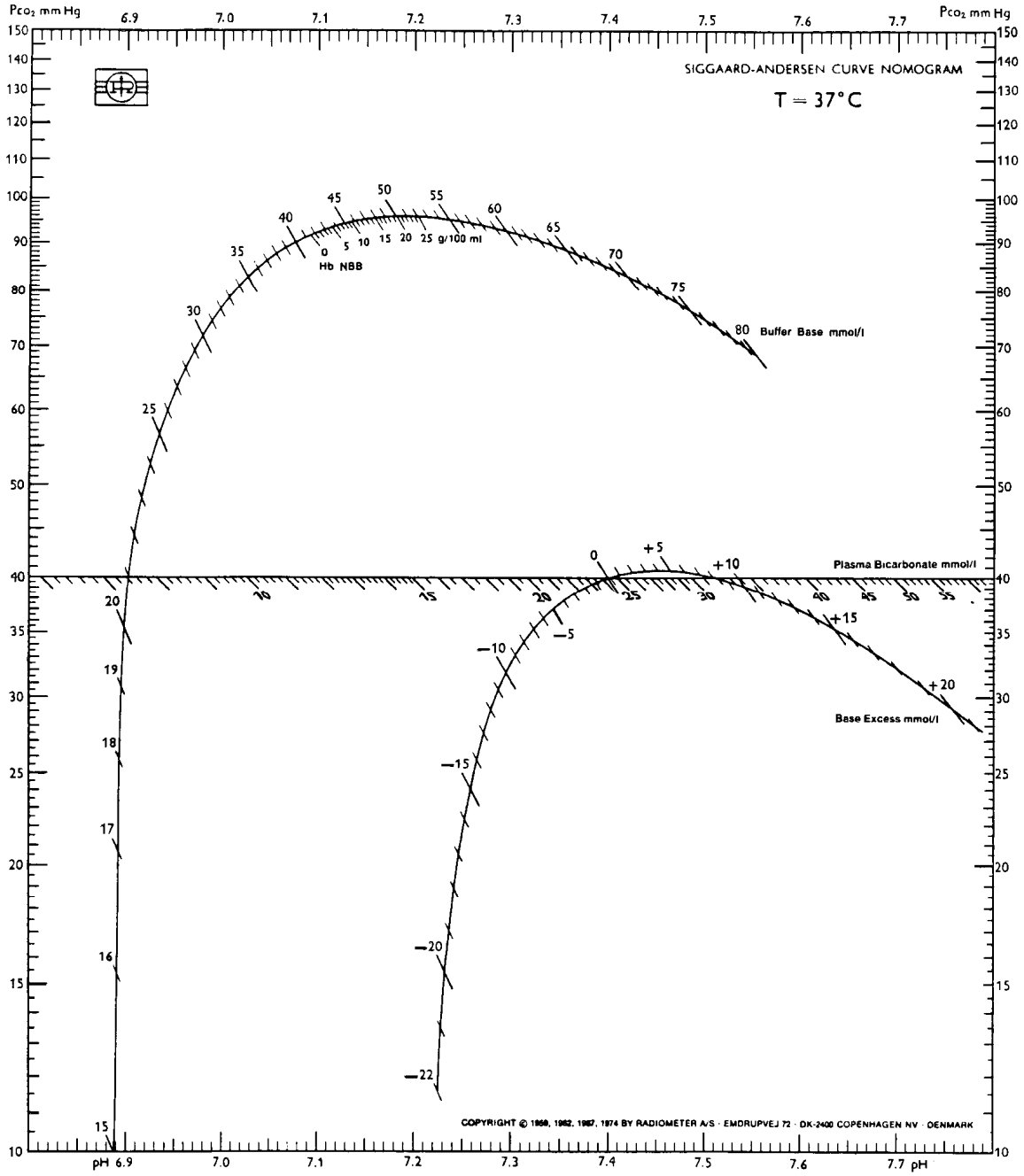
Zeitpunkt	pH	pCO_2 [mmHg]	BE [mmol/l]	Aktuelles HCO_3^- [mmol/l]	Beurteilung
Vor Belastung					
Nach Belastung					
10 min Erholung					

Überlegen Sie, welche Änderungen im Säure-Basen-Haushalt sich bei folgenden Erkrankungen oder Situationen ergeben. Geben Sie in Tabelle 5.13 die Blutparameter für die akute Situation sowie die Kompensation an.

Tabelle 5.13

Erkrankung		pH	pCO_2 [mmHg]	BE [mmol/l]	Beurteilung
Diabetes mellitus	Akut				
	Kompensation				
Erbrechen	Akut				
	Kompensation				
Durchfall	Akut				
	Kompensation				
Restriktive Lungenfunktionsstörung	Akut				
	Kompensation				
Obstruktive Lungenfunktionsstörung	Akut				
	Kompensation				
Höhenaufenthalt	Akut				
	Kompensation				
Herzinfarkt	Akut				
	Kompensation				
Anämie	Akut				
	Kompensation				

Abb. 5.1 Siggaard-Andersen Nomogramm


Pco₂ mm Hg
SIGGAARD-ANDERSEN CURVE NOMOGRAM
T = 37°C
Hb NBB
g/100 ml
Buffer Base mmol/l
Plasma Bicarbonate mmol/l
Base Excess mmol/l
COPYRIGHT © 1958, 1962, 1967, 1974 BY RADIOMETER A/S · EMDRUPVEJ 72 · DK-2400 COPENHAGEN NV · DENMARK
pH

HERZ

GK 3.1 – 3.3

Lehrbücher: Speckmann / Hescheler / Köhling, 5. Aufl., Kap. 8
Klinke / Pape / Kurtz / Silbernagl, 6. Aufl., Kap. 5
Schmidt / Lang, 30. Aufl., Kap. 25 - 27

Fallbeispiel: Ein Patient klagt über ein Engegefühl in der Brust und Schmerzen im Brustbereich, die in die linke Schulter-Arm-Hand-Region ausstrahlen. Der Patient berichtet weiterhin über Atemnot, hat eine hochrote Gesichtsfarbe und ist übergewichtig. Eine Blutdruckmessung in Ruhe ergibt 170 mmHg systolisch und 115 mmHg diastolisch. Zur weiteren Diagnostik werden ein Elektrokardiogramm und ein Echokardiogramm durchgeführt.

ELEKTRISCHE AKTIVITÄT DES HERZENS: DAS ELEKTROKARDIOGRAMM

Aufgabe:

Registrierung des Oberflächen-EKGs, Auswertung des EKGs in Bezug auf Erregungsursprung, Herzfrequenz, Überleitungszeiten, Systolendauer, Herzlage, Herzfrequenzregulation und Herzfrequenzvariabilität.

Stichwörter:

Oberflächen-EKG, Integralvektor, Ableitungen nach Einthoven und Goldberger, RR-Intervall, PQ-Dauer, QT-Dauer, Cabrera-Kreis, Lagetypen, respiratorische Sinusarrhythmie

Geräte:

EKG-Schreiber, Stoppuhr

Physiologische Grundlagen des EKGs

Das Aktionspotential ist ein Vorgang, der sich an Nerven- und Muskelzellen im Bereich der Zellmembran abspielt.

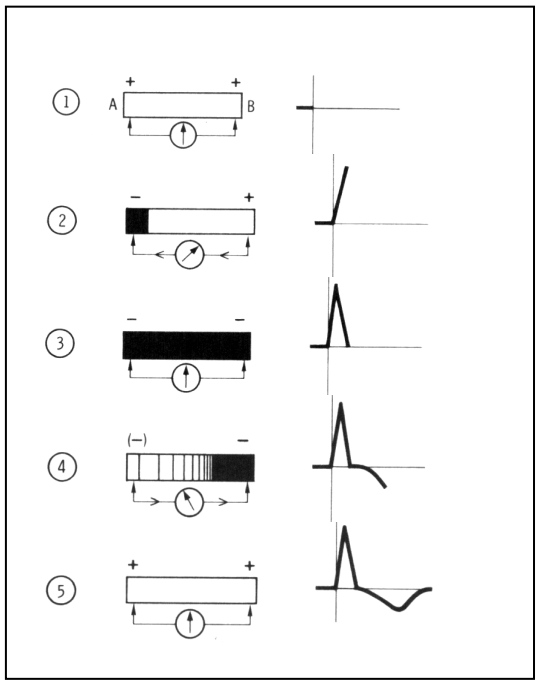
Das Aktionspotential einer Herzmuskelzelle unterscheidet sich dabei vom Aktionspotential einer Nervenzelle oder einer Skelettmuskelzelle durch seine Dauer.

Nervenzelle:	ca. 2 ms
Skelettmuskelzelle:	ca. 10-15 ms
Herzmuskelzelle:	ca. 300 ms

Für die lange Dauer des Aktionspotentials einer Herzmuskelzelle ist wesentlich der Ca^{2+}-Einstrom während der Plateauphase des Aktionspotentials verantwortlich.

Damit ein an der Körperoberfläche messbares elektrisches Potential entsteht, müssen in einem geordneten Ablauf und zeitlich versetzt sehr viele Zellen ihr Aktionspotential ausbilden. Als vereinfachtes Modell des Herzens kann dabei ein isoliertes Muskelstreifenpräparat dienen. Die Ableitelektroden sind dabei an der Oberfläche des Muskelstreifens angebracht und erfassen somit nicht das Membranpotential der Zellen, sondern nur die Potentialdifferenz zwischen den Extrazellulärräumen der jeweiligen Enden (A und B) des Muskelstreifens. Ein System mit zwei Polen, zwischen denen eine Potentialdifferenz bestehen kann, ist eine elektrische Spannungsquelle.

Abb. 6.1 Dipoltheorie zur Entstehung des EKGs



Im Ruhezustand (1) ist der Extrazellulärraum elektrisch neutral, es herrscht keine Potentialdifferenz zwischen den Enden A und B des Dipols. Mit dem Beginn eines Aktionspotentials (2) an der Seite A des Muskelstreifens kommt es zu einen plötzlichen Abzug von positiv geladenen Ionen (Na^+) aus dem Extrazellulärraum (schneller Natrium-Einstrom). Die Elektrode A ist in diesem Moment durch den Verlust an positiven Ionen auf einem „negativen" Potential gegenüber der Elektrode B. Da sich eine Erregung mit einer begrenzten Geschwindigkeit von A nach B ausbreitet, bleibt diese Potentialdifferenz so lange bestehen, bis alle Zellen des Herzmuskelstreifens depolarisiert sind. Die Potentialdifferenz zwischen A und B ist zu diesem Zeitpunkt wieder gleich Null (3). Im Verlauf der Repolarisation, die wiederum mit begrenzter Geschwindigkeit von A nach B verläuft, kommt es zunächst im Bereich der Elektrode A zu einem „Wiederauffüllen" von positiv geladenen Ionen (Ausstrom von K^+ zum Aufbau des Ruhemembranpotentials) und somit zu einer erneuten Potentialdifferenz zwischen A und B, aber mit umgekehrtem Vorzeichen (4). Erst nach vollständig abgelaufener Repolarisation besteht erneut keine Potentialdifferenz zwischen A und B (5).

Das Herz als Ganzes ist das Integral vieler solcher kleiner Muskelstreifen. Die dadurch gebildete integrale Spannungsquelle kann durch einen Vektor beschrieben werden. Die Lage des Vektors im Raum beschreibt die Lage der beiden Pole der Spannungsquelle und der Betrag des Vektors die Spannung (Potentialdifferenz). Man spricht hier vom sogenannten Integralvektor.

Die Pole der durch den Integralvektor beschriebenen Spannungsquelle sind für die Kontakte eines Messgeräts allerdings nicht direkt zugänglich. Beim Oberflächen-EKG macht man sich zunutze, dass eine elektrische Spannungsquelle in dem sie umgebenden Raum ein elektrisches Feld induziert, das die Spannungsquelle eindeutig beschreibt. Da sich das elektrische Feld bis zur Körperoberfläche ausdehnt, können hier Elektroden angelegt und eine Spannung registriert werden (Abb. 6.2). Die Lage der Elektroden beeinflusst dabei die an der Körperoberfläche messbare Spannung (Vektorprojektion, Ableitebene).

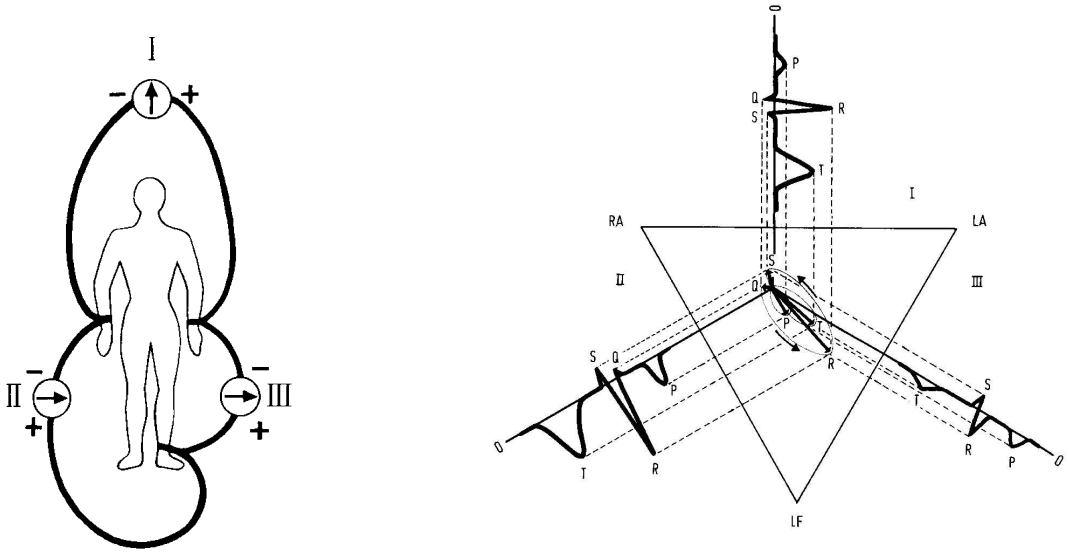
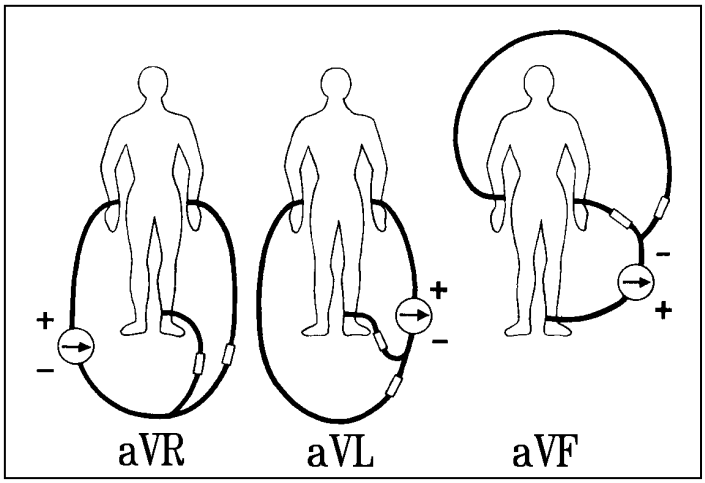


Abb. 6.2 Ableitungen nach Einthoven (I, II, III; links) und Projektion eines Integralvektors in der Frontalebene auf die Ableitebenen (rechts)

Für das Oberflächen-EKG beim Menschen gibt es neben den in Abb. 6.2 gezeigten Ableitungen nach Einthoven noch standardisierte Ableitpunkte nach Goldberger (s. Abb. 6.3) als weitere Extremitätenableitungen und Brustwandableitungen nach Wilson und Nehb.

Abb. 6.3 Ableitungen nach Goldberger (aVR, aVL, aVF)

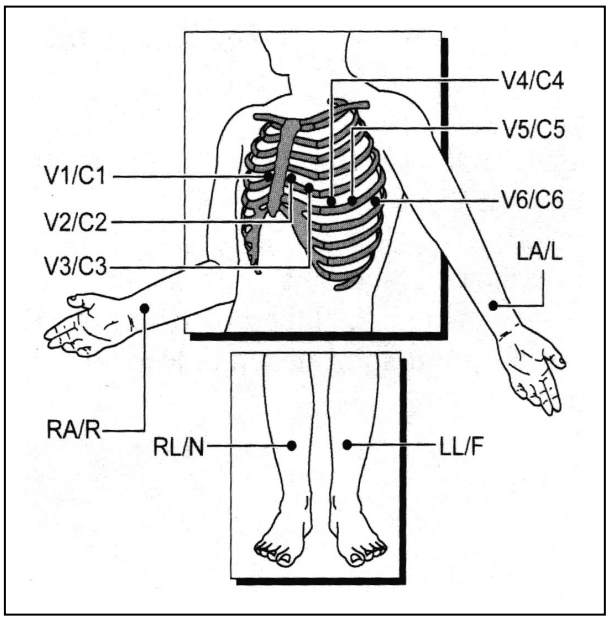


Brustwandableitungen nach Wilson

Als indifferente Elektrode wird eine Sammelelektrode verwendet, die durch Zusammenschalten der drei Elektrodenkabel von den Extremitäten (re. Arm, li. Arm, li. Bein) über Widerstände von 5000 Ohm gebildet wird.

Die differenten Elektroden V_1 bis V_6 werden wie folgt befestigt:

V_1: 4. ICR re. parasternal
V_2: 4. ICR li. parasternal
V_3: Mitte zwischen V_2 und V_4
V_4: Schnittpunkt 5. ICR li.
in der Medioklavikularlinie
V_5: Schnittpunkt vordere Axillarlinie
mit der durch V_4 gelegten Horizontalebene
V_6: Schnittpunkt mittlere Axillarlinie
mit der durch V_4 gelegten Horizontalebene



Geräte:

Ein EKG-Schreiber stellt die kleinen Spannungen, die durch die elektrische Herzaktivität an der Körperoberfläche abgreifbar sind, auf einem Papierschreiber oder einem Monitor dar. Auf dem Papierschreiber wird der zeitliche Verlauf der elektrischen Herzaktivität dargestellt und dokumentiert. Moderne EKG-Geräte erlauben die gleichzeitige Darstellung des Spannungsverlaufs an verschiedenen Ableitpunkten. Bei einem Papiervorschub von 50 mm/s ist eine zeitliche Auflösung von bis zu 10 ms möglich.

Die in einem EKG vorkommenden Wellen und Zacken besitzen eine standardisierte Bezeichnung. Wie bei dem isolierten Muskelstreifen hat der Integralvektor nur dann einen Betrag größer Null, wenn sich eine Erregungs- oder Repolarisationsfront über das Herz ausbreitet. Nur dann ist eine Spannung an der Körperoberfläche messbar. Strecken im EKG, z. B. die ST-Strecke, während der keine Integralvektoren über das Myokard laufen (warum?), werden isolelektrisch bezeichnet. Für die Dauer der Wellen, Zacken und Strecken gibt es Normwerte, die geringfügig frequenzabhängig sind. Die Intervalle, v. a. das QT-Intervall, sind in ihrer Länge stark frequenzabhängig.

Bitte überlegen Sie, welche Herzphase während des QT-Intervalls abläuft.

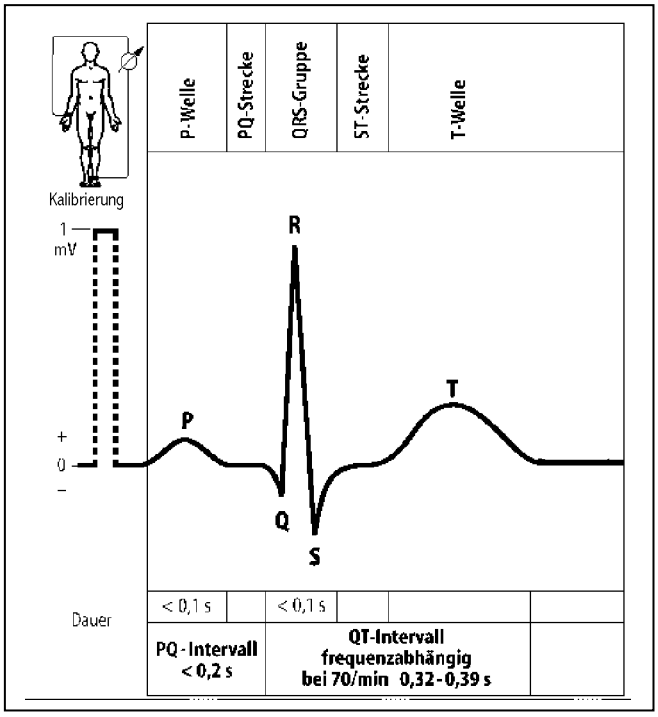


Abb. 6.4 EKG in der Standardableitung Einthoven II

AUFGABEN

Demonstration: EKG nach Wilson, Einthoven und Goldberger

An einem liegenden Probanden werden von den übrigen Praktikumsteilnehmern die erforderlichen Elektroden für eine 6-Kanal-Ableitung nach Wilson sowie die Ableitungen nach Einthoven und Goldberger (welche sind das?) angebracht. Der resultierende EKG-Schrieb dient als Beispiel (keine Auswertung).

Für die nachfolgenden Aufgaben läst **jeder** Praktikumsteilnehmer von sich (als Proband) sein eigenes EKG mit Hilfe der anderen Gruppenmitglieder aufzeichnen.

Sofern nicht anders angegeben, werden die Ableitungen nach Einthoven verwendet.

Nach dem Anbringen der Ableitungen sollte als Vorübung für Aufgabe 4 das Aufstehen des Probanden einmal in Ruhe ausprobiert werden. Anschließend werden alle für die Aufgaben 1-4 die erforderlichen EKGs nacheinander aufgezeichnet.

Aufgabe 1: Ruhe-EKG, Herzfrequenzvariabilität und Muskelartefakte

Nach Abgleich und Kalibrierung des EKG-Geräts wird ein EKG mit 25 mm/s geschrieben. Hierbei liegt der Proband zunächst für **15 s** entspannt und atmet ruhig und gleichmäßig. Dann spannt er die Muskeln eines Arms für ca. 5 s an, und zuletzt bewegt er für ca. 5 s den gesamten Körper.

a) Qualitätskontrolle: Erkennen von Artefakten und nicht regulären Schlägen am Ruhe-EKG:
b) EKG-Bezeichnungen: P-Welle, QRS-Komplex, T-Welle, PQ-Zeit, QT-Intervall, ST-Strecke im EKG-Schrieb kennzeichnen (EKG einkleben!)
c) Erregungsursprung anhand des EKGs bestimmen
d) Minimale und maximale Herzfrequenz sowie mittlere Herzfrequenz bestimmen
e) Zeiten: Überleitungszeit Vorhöfe – Ventrikel (PQ-Zeit) aus 5 Schlägen bestimmen
   Systolendauer (QT-Intervall) aus 5 Schlägen bestimmen

Auswertbogen siehe nächste Seite.

Hier bitte EKG-Schrieb einkleben.

EKG-Auswertung

Patient
Initialen ⌊_⌋⌊_⌋ Geburtstag ⌊_ _ _ _ _ _ _ _⌋
Geschlecht W M Digitalis ◯
Antiarrhythmika: ⌊_____⌋

RR-Intervalle
regelmäßig J N

Frequenz
⌊_ _ _⌋ / min Tachykardie ◯ (>90/min) Bradykardie ◯ (<50/min)

P-Welle
positiv in I, II, III (Sinusrhythmus) J N
regelmäßig, gefolgt von QRS J N absolute Arrhythmie (Vorhofflimmern) ◯
„Sägezahn“ (Vorhofflattern) ◯

PQ-Zeit
0,12-0,20 s J N kürzer ◯ länger (AV-Block) ◯

Lagetyp
altersgerecht J N überdr. Rechtstyp ◯ Rechtstyp ◯ überdr. Linkstyp ◯
Steiltyp ◯ Indifferenztyp ◯ Linkstyp ◯

QRS-Komplex
QRS-Dauer normal <0,1 s J N Inkompletter Schenkelblock (0,10 - 0,12 s) ◯
kompletter Schenkelblock (> 0,12 s) ◯

ST-Strecke
isoelektrisch J N
ST-Hebung in ◯ V_1 ◯ V_2 ◯ V_3 ◯ V_4 ◯ V_5 ◯ V_6
◯ I ◯ II ◯ III ◯ aVR ◯ aVL ◯ aVF
ST-Senkung in ◯ V_1 ◯ V_2 ◯ V_3 ◯ V_4 ◯ V_5 ◯ V_6
◯ I ◯ II ◯ III ◯ aVR ◯ aVL ◯ aVF

T-Welle
positiv in I- III, V_1 - V_4 J N T-Negativierung ◯

QT-Dauer
QT_C normal (0,40 – 0,44 s) J N QT-Dauer ⌊_ , _ _⌋
frequenzkorrigierte QT-Dauer (QT_C) ⌊_ , _ _⌋
nach Bazett: (QT [s] / √(RR

Beurteilung (EKG-Diagnose)
⌊_____⌋
normal ◯ fraglich pathologisch ◯ pathologisch ◯

Aufgabe 2: Respiratorische Sinusarrhythmie

Es wird ein EKG mit 50 mm/s geschrieben. Hierbei liegt der Proband zunächst für ca. 5 s entspannt und atmet ruhig und gleichmäßig. Danach führt er innerhalb von ca. 10 s eine maximale Inspiration gefolgt von einer ca. 10 s andauernden maximalen Exspiration durch. Dieser Vorgang wird **wiederholt**.

Anschließend wird das EKG-Gerät auf die Ableitungen nach Goldberger umgestellt, kalibriert und der Versuch erneut **zweimal** durchgeführt (nach Beendigung des Versuchs wieder auf die Ableitungen nach Einthoven zurückstellen und kalibrieren).

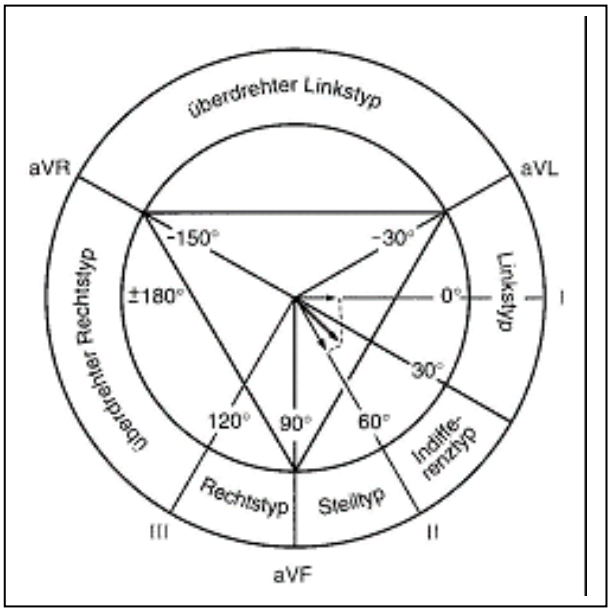
Eine Hilfsperson markiert jeweils Beginn und Ende der In- und Exspiration auf dem EKG-Schrieb.

Bitte EKG einkleben und In-/Exspiration markieren.

Wie verändert sich die Frequenz?

Aufgabe 3: Elektrische Herzachse (Herzlage)

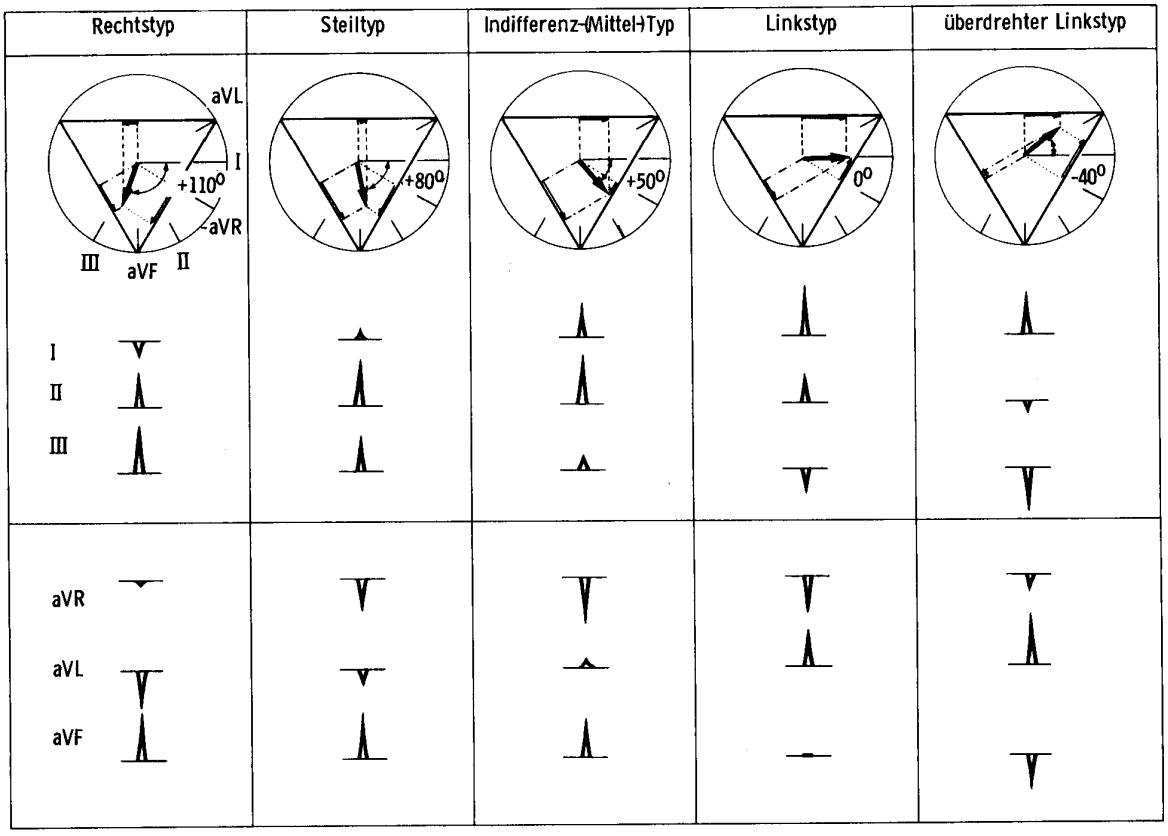
Bestimmung der Lage des Hauptvektors im Cabrerakreis in **Ruhe**, bei maximaler **Inspiration** und maximaler **Exspiration** (jeweils zum Ende der jeweiligen Phase). Die Herzlage kann durch Vergleich der R-Zacken-Amplituden der Ableitungen I bis III und aVR, aVL und aVF erfolgen (s. auch Abb. 6.5).



Der Winkel α zwischen der Horizontalen und der Richtung des Summenvektors bestimmt den Lagetyp. Während beim Neugeborenen noch ein Rechtstyp physiologisch ist (warum?), verändert sich die Lage der elektrischen Herzachse im Laufe des Lebens entgegen dem Uhrzeigersinn.

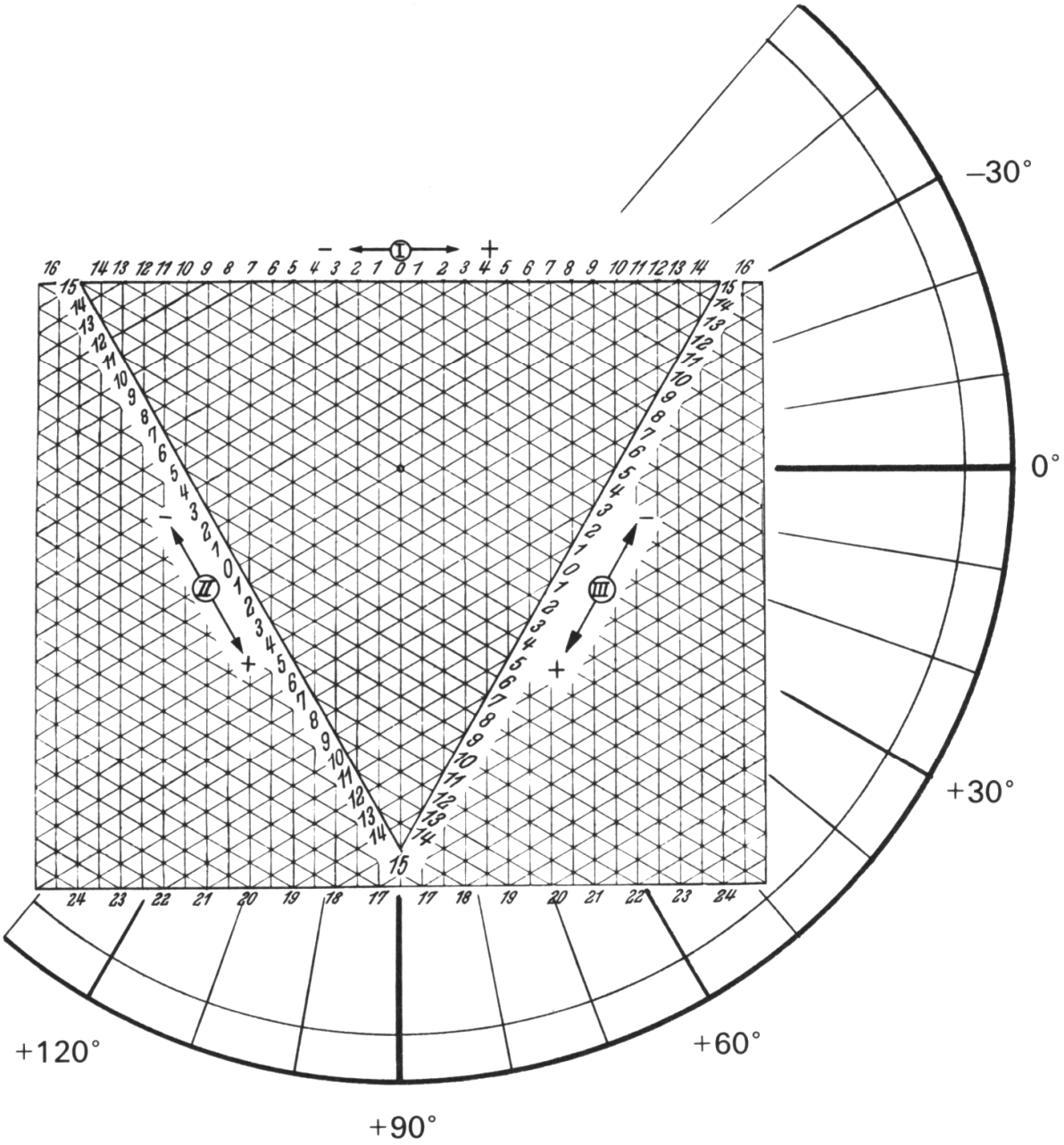
Da die Größe der Einzelvektoren von der elektrisch aktiven Herzmuskelmasse in der jeweiligen Ableitrichtung abhängig ist, kann z. B. eine Hypertrophie des linken Ventrikels zu einer Lageveränderung nach links führen. Der Lagetyp mit einem Winkel α zwischen 0° und 30° wird auch als Horizontaltyp bezeichnet.

Abb. 6.5 Cabrera-Kreis zur Ermittlung der Herzlage durch Vergleich der R-Zacken-Amplituden.



Bestimmen Sie die Herzlage auf zwei verschiedene Arten:

1. Vergleich der R-Zacken-Amplitude der Ableitungen I-III und aVR, aVL und aVF mit der oben abgebildeten Tabelle.
2. Rekonstruktion des Integralvektors in nachfolgender Abbildung:



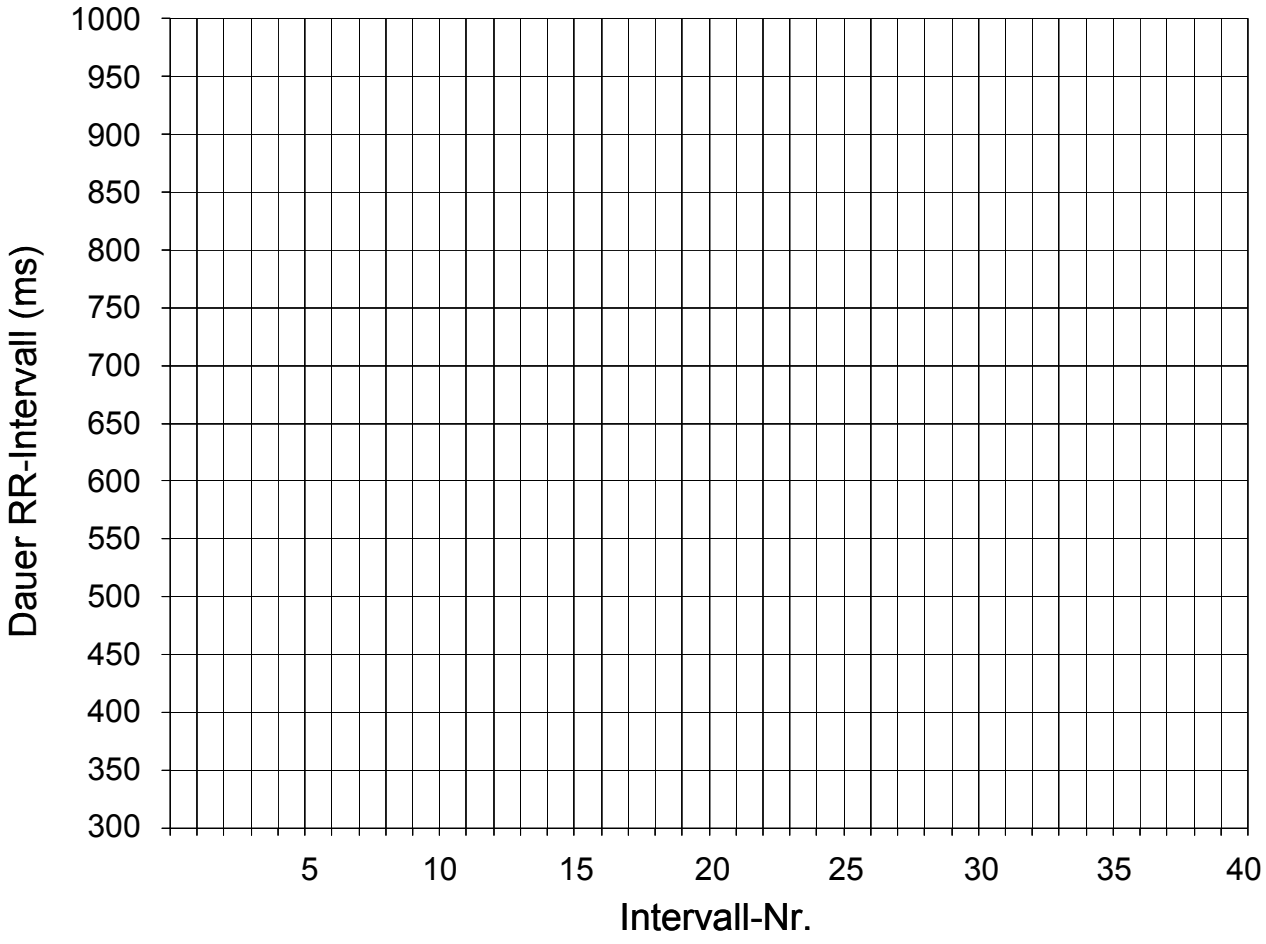
Lagetyp	Winkel im Cabrera-Kreis
Überdrehter Linkstyp	< -30°
Linkstyp	-30° bis +30°
Indifferenztyp	+30° bis +60°
Steiltyp	+60° bis +90°
Rechtstyp	+90° bis +120°
Überdrehter Rechtstyp	> 120°

Aufgabe 4: Herzfrequenzregulation

Vor Beginn des Versuchs sollte der Proband bereits einige Minuten ruhig liegen. Es wird ein EKG mit 25 mm/s geschrieben. Der Proband liegt dabei zunächst entspannt und atmet ruhig und gleichmäßig. Nach ca. 5 s steht der Proband schnell auf (Elektroden nicht abreißen!) und bleibt für weitere **30 s** ruhig stehen (Arme locker hängen lassen).

a) Qualitätskontrolle: Erkennen von Artefakten und nicht regulären Schlägen

b) Herzfrequenz: Ausmessen **aller** RR-Abstände des EKG-Schriebs in ms und direkte graphische Darstellung (X-Achse: Intervall-Nr., Y-Achse: Dauer RR-Intervalls in ms)



MECHANISCHE AKTIVITÄT DES HERZENS – ANPASSUNG AN BELASTUNG

Die primären Funktionen des Herzens sind der Auswurf von desoxygeniertem Blut in die Lungen (rechtes Herz) und die Versorgung der peripheren Organe mit oxygeniertem Blut (linkes Herz). Dabei muss das Herz sowohl ein ausreichendes Blutvolumen pro Zeiteinheit (Herzzeitvolumen) fördern als auch einen ausreichenden Druck zur Überwindung des Gefäßwiderstandes aufbauen. In Ruhe wird bei jedem Herzschlag sowohl vom rechten als auch vom linken Ventrikel jeweils ein Schlagvolumen von 70 ml ausgeworfen. Die Herzfrequenz beträgt normalerweise ca. 70 Schläge/Minute. Daraus resultiert ein Herzzeitvolumen von annähernd 5 Litern/Minute unter Ruhebedingungen. Unter Belastungsbedingungen kann das Herzzeitvolumen erheblich gesteigert werden. Im Extremfall verdoppelt sich das Schlagvolumen und die Herzfrequenz steigt um den Faktor 2,5 - 3,0 an, so dass ein Herzzeitvolumen von 25 - 30 Litern/Minute gefördert werden kann.

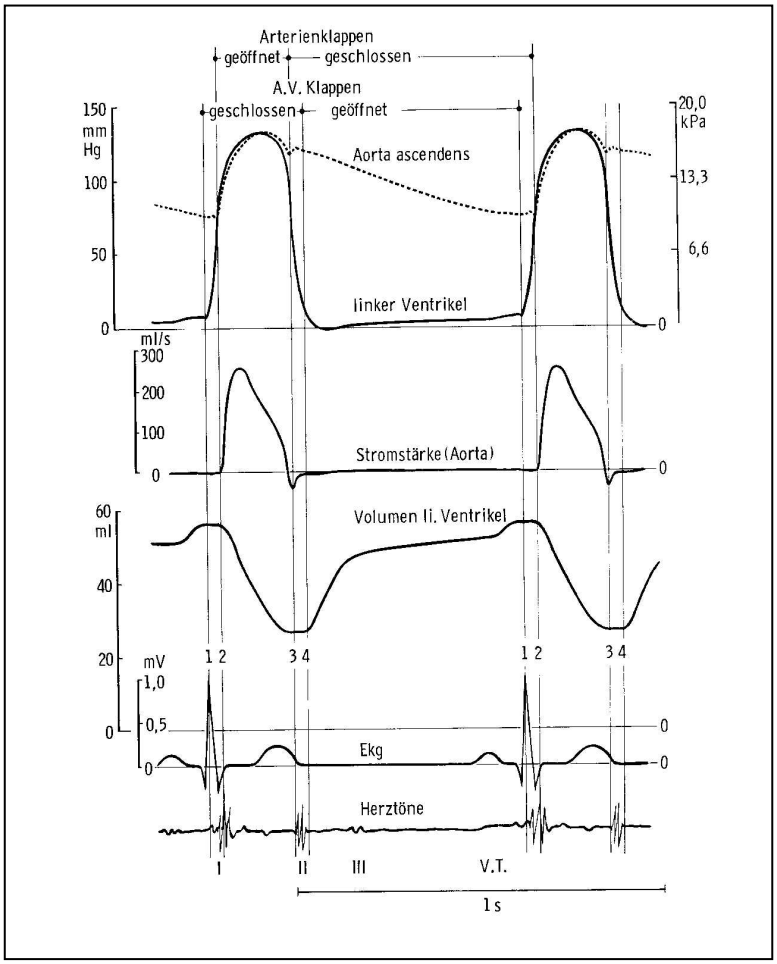


Abb. 6.6 Die Phasen des Herzzyklus. Oberhalb des EKG befinden sich die Zahlen für die Grenzen der Herzphasen

Die Systole beginnt mit der isovolumetrischen Anspannungsphase (1). Erreicht der Druck im linken Ventrikel den diastolischen Aortendruck (2), so öffnet sich die Taschenklappe, und die Austreibungsphase beginnt. Das Volumen des linken Ventrikels nimmt ab, die Stromstärke in der Aorta steigt an ((2) bis (3)). Die Austreibungsphase wird als auxoton bezeichnet, da gleichzeitig Druck- und Volumenänderungen stattfinden. Die Diastole ist definiert als der Zeitraum zwischen Aorten- und Mitralklappenschluss. Sie ist unterteilt in die isovolumetrische Relaxation ((3); Schluss der Aortenklappe bis Öffnung der Mitralklappe) und die Phase der Füllung einschließlich der Vorhofkontraktion ((4) bis (1)).

Echokardiographie

Aufgabe:

Registrierung der Herzgeometrie durch Ultraschall-Sonographie.

Stichwörter:

Ultraschall, Sonographie, Ventrikelfunktion, Systole, Diastole, Vorlast, Nachlast, Wandspannung, Laplace-Gleichung

Geräte:

Ultraschallsonograph, Blutdruckmessgerät

Die Parameter, Druck (Herzkatheter) und Volumen (Ventrikulographie, Echokardiographie) können auch klinisch erfasst werden. Das Prinzip der Echokardiographie entspricht technisch dem der Echolotung. Hierbei werden Ultraschallimpulse ausgesendet, die an Grenzflächen reflektiert werden. Aus der Laufzeit, die ein Impuls vom Schallsender bis zur reflektierenden Grenzfläche und zurück benötigt, kann unter Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit in dem jeweiligen Medium die Entfernung vom Schallkopf zur reflektierenden Grenzfläche berechnet werden.

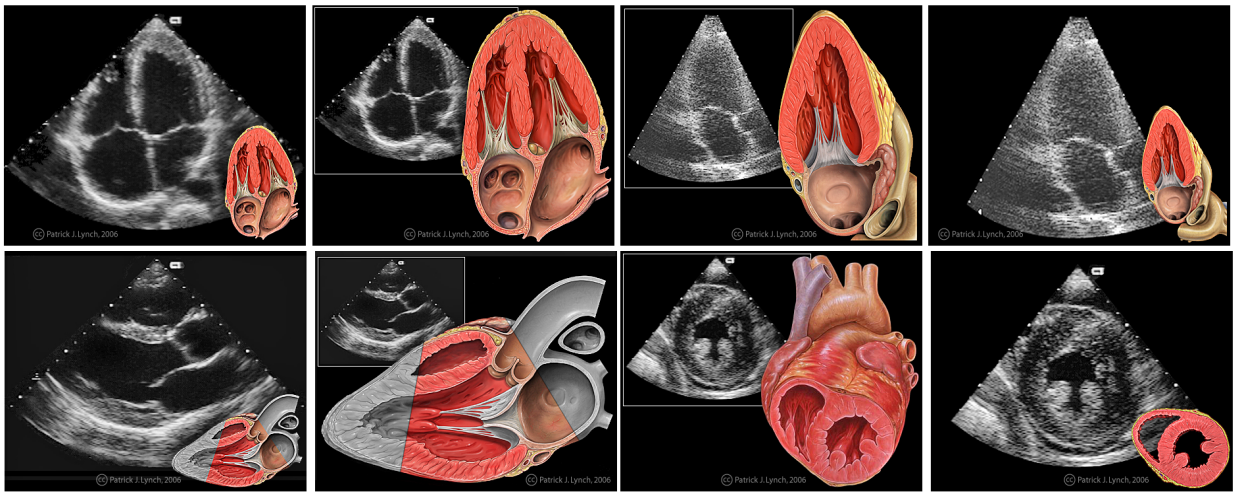


Abb. 6.7 Verschiedene Schnittebenen durch das Herz und korrespondierende echokardiografische Abbildungen (Patrick J. Lynch; illustrator; C. Carl Jaffe; MD; cardiologist Yale University, Center for Advanced Instructional Media Medical Illustrations)

Der Schallkopf, der gleichzeitig Sender und Empfänger ist, wird an der Thoraxwand angesetzt. Der Schallimpuls wird an den Grenzflächen verschiedener Gewebearten partiell reflektiert (Abb. 6.7). Dementsprechend treffen mehrere Echoimpulse zeitlich versetzt wieder am Schallkopf ein. Im dargestellten Beispiel sind die reflektierenden Grenzflächen die Thoraxwand, die freie Wand des rechten Ventrikels, das Septum und die freie Wand des linken Ventrikels. Die reflektierten Schallimpulse können dann in Abhängigkeit von der Entfernung des reflektierenden Mediums auf einem Oszillographen dargestellt werden. Diese Darstellung kann entweder anhand der Amplitudenhöhe (A-Mode), oder in Abhängigkeit von der Amplitudenhöhe als Punkte unterschiedlicher Helligkeit (= Brightness, B-Mode) erfolgen. Sendet man nicht nur einen Impuls aus, sondern ein hochfrequentes (periodisches) Signal (1000 Impulse/s), so kann man bei einer entsprechenden horizontalen Auslenkung die Bewegung der jeweiligen reflektierenden Struktur erfassen (M = Motion, M-Mode). Die Impulse können dann auf einem Speicheroszillograph dargestellt werden. Bei gleichzeitiger Aufzeichnung des EKGs können die Änderungen dem Herzzyklus zugeordnet werden.

Druck-Volumen-Diagramm

Kontraktionsformen des Herzmuskels

Die Phasen des Herzzyklus lassen sich in einem Diagramm (Abb. 6.8) darstellen, in dem der Druck auf der Ordinate und das Volumen auf der Abzisse abgetragen wird. In diesem Druck-Volumen-Diagramm wird das elastische Verhalten des erschlafften Muskels bei passiver Dehnung durch die Ruhedehnungskurve charakterisiert. Für die Ventrikel gibt die Ruhedehnungskurve diejenigen Drucke an, die den verschiedenen Volumina bei passiver Ventrikelfüllung zugeordnet sind. Die Steigung dieser Beziehung ist ein Maß für den Widerstand, den der Ventrikel der Füllung entgegensetzt, d. h. die Steilheit der Kurve gibt die Steifigkeit des Muskels wieder. Mit zunehmender Füllung nimmt die Steifigkeit des Ventrikels zu, bzw. die Dehnbarkeit des Ventrikels nimmt mit zunehmender Füllung ab.

In einem Experiment kann ein isoliertes Herz unter zwei verschiedenen Bedingungen zur Kontraktion veranlasst werden. Erfolgt der Auswurf des Blutes aus dem Ventrikel gegen einen vernachlässigbar kleinen Widerstand, so spricht man von einer isotonischen Kontraktion. Wird dagegen der Blutauswurf verhindert (unendlich hoher Widerstand), dann führt der Muskel eine isovolumetrische Kontraktion aus. Jedem Füllungszustand, d. h. jedem Punkt der Ruhedehnungskurve kann man beliebig viele isotonische und isovolumetrische Kontraktionen zuordnen. Die maximalen Kontraktionen enden auf den Kurven der isotonischen und isovolumetrischen Maxima (Abb. 6.8). Die Maximalkontraktionen nehmen zunächst mit steigender Füllung zu, um dann wieder kleiner zu werden. Das Herz ist also in der Lage, - in Abhängigkeit von der Ausgangsfüllung - unterschiedliche Drucke zu entwickeln bzw. Schlagvolumina zu fördern. In situ führt die Ventrikelmuskulatur zunächst eine isovolumetrische und dann eine auxotone Kontraktion aus, bei der sich Druck und Volumen ändern (Abb. 6.8). Eine solche Kontraktionsfolge ist mit der Unterstützungskontraktion des Skelettmuskels vergleichbar. Die Ventrikelkontraktionen in situ erreichen daher die entsprechend bezeichnete Kurve der Unterstützungsmaxima, die zwischen den Kurven der isotonischen und der isovolumetrischen Maxima verläuft.

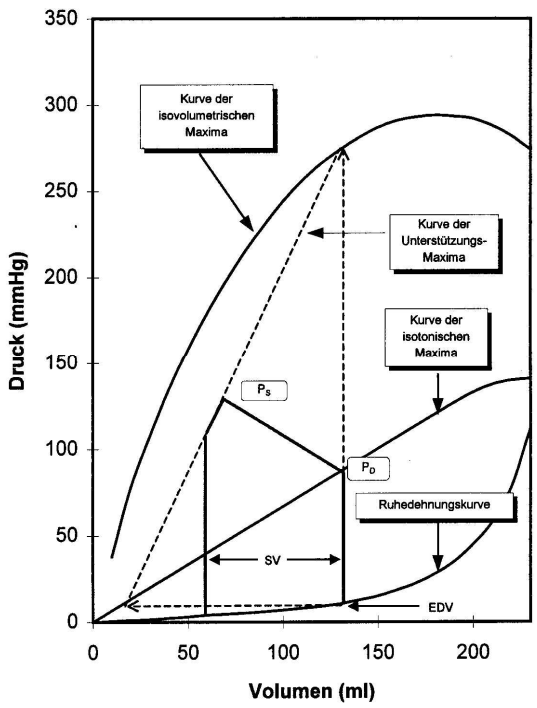
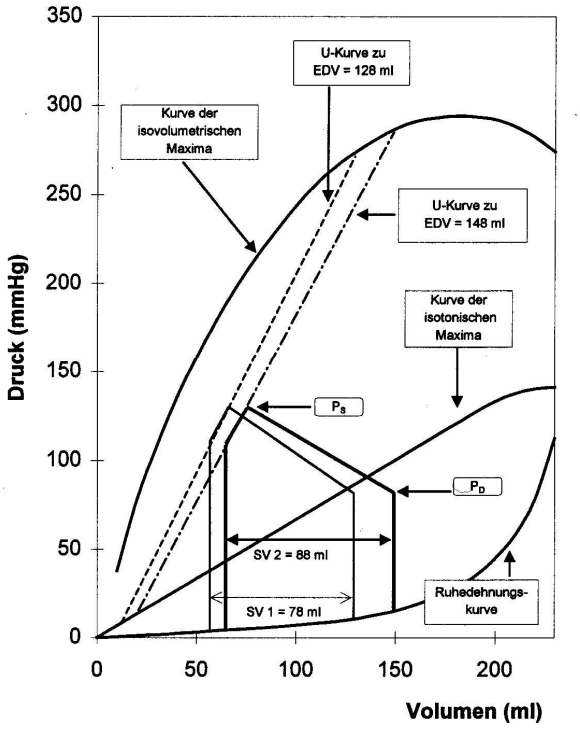


Abb. 6.8 Druck-Volumen-Diagramm des Ventrikels

In der Abbildung 6.8 sind die vier Phasen der Herzaktion für den linken Ventrikel dargestellt. Die Systole beginnt mit der **isovolumetrischen Anspannungsphase**, die von der **Austreibungsphase** gefolgt ist. Der sich anschließenden **isovolumetrischen Relaxation** folgt die **Füllungsphase**. Die Fläche, die von der Druck-Volumen-Kurve eingeschlossen wird, entspricht der Arbeit, die während eines Herzzyklus geleistet wird.



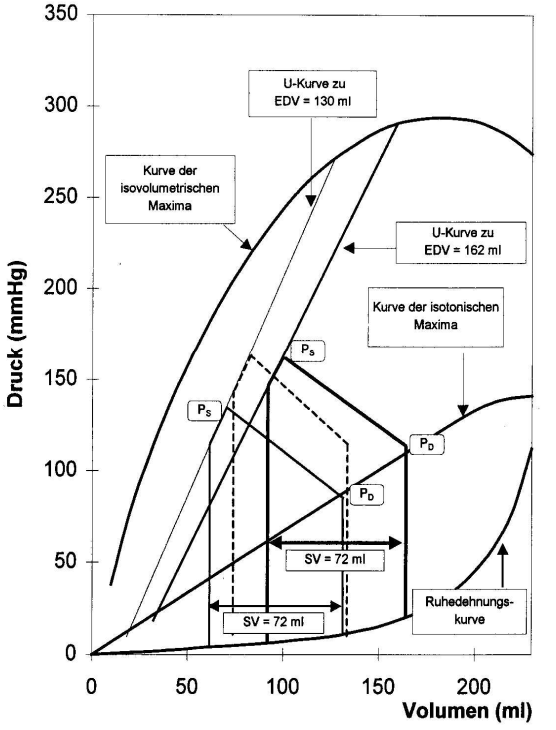
Intrakardiale Anpassungsmechanismen

Experimentelle Untersuchungen am Säugetierherzen durch Frank und Starling haben gezeigt, dass auch nach Durchtrennung der Herznerven bei konstanter Herzfrequenz eine Anpassung der Herzarbeit möglich ist. Ein erhöhtes venöses Angebot, d. h. ein erhöhter Rückstrom von Blut zum Herzen und damit eine gesteigerte Ventrikelfüllung, wird durch eine Zunahme des Schlagvolumens beantwortet. Der Mechanismus dieser Anpassung ist in der Abb. 6.9 im Druck-Volumen-Diagramm dargestellt. Man erkennt, dass im Vergleich zur Ausgangssituation das größere venöse Angebot eine vermehrte Füllung des Ventrikels zur Folge hat.

Die dadurch weiter gedehnten Herzmuskelfasern verkürzen sich stärker, und das Schlagvolumen steigt an. Dieser Anpassungsmechanismus wird als Frank-Starling-Mechanismus bezeichnet.

Abb. 6.9 Anpassung des Schlagvolumens an eine gesteigerte Füllung

Physiologische Bedeutung. Für das nicht denervierte Herz in situ ist dieser Mechanismus bei kurzfristigem Volumenausgleich bei Änderungen des venösen Blutangebotes an das Herz von Bedeutung. Er spielt insbesondere bei der Anpassung der Schlagvolumina von rechtem und linkem Herz im Rahmen der Inspiration/Exspiration eine Rolle.



Ebenso wie bei einer akuten Volumenbelastung erfolgt bei Steigerungen des Aortendruckes eine intrakardiale Anpassung auf Schlag-zu-Schlag-Basis (Abb. 6.10). Ein Anstieg des Aortendruckes ist von einer verstärkten Druckentwicklung des Ventrikels gefolgt, jedoch auf Kosten einer Reduktion des Schlagvolumens. Dadurch steigt das am Ende der Systole im Ventrikel verbleibende Volumen (Restvolumen) an. Bei der nächsten Herzaktion steigt wegen des unverminderten venösen Rückstroms das enddiastolische Volumen an. Die stärker gedehnten Muskelfasern können dann erneut ein höheres Schlagvolumen gegen den höheren Aortendruck auswerfen.

Auch in diesem Fall ist also die vermehrte Füllung des linken Ventrikels zum Zeitpunkt der Enddiastole von entscheidender Bedeutung.

Abb. 6.10 Anpassung des Schlagvolumens an einen erhöhten Aortendruck

Determinanten der Ventrikelkontraktion

Es gibt vier Determinanten der Ventrikelfunktion:

1. Vorlast
2. Nachlast
3. Inotropie
4. Herzfrequenz

Vorlast

Die enddiastolische Füllung des Ventrikels wird als Vorlast des Ventrikels bezeichnet. Eine Erhöhung der Vorlast ist von einer Steigerung des Schlagvolumens und/oder des maximal entwickelten Druckes während der Kontraktion gefolgt; eine Verringerung der Vorlast führt zu einer Abnahme des Schlagvolumens und/oder des maximal entwickelten Druckes während der Kontraktion. Da das Herz unter physiologischen Bedingungen immer nahe der optimalen Faservordehnung arbeitet, kann über diesen Mechanismus eine maximale Zunahme des Schlagvolumens von etwa 10 % erreicht werden (= Vorlast-Reserve)!

Nachlast

Vor Beginn der Austreibungsphase steigt während der isovolumetrischen Anspannungsphase der Ventrikeldruck so weit, bis die Kraft zum Öffnen der Klappen und zum Auswerfen des Schlagvolumens ausreicht. Das Integral der Wandspannung während der Systole des Ventrikels ist die Nachlast.

Die Laplace - Beziehung

Zur Berechnung dieser Kraft betrachten wir den Ventrikel als einen dickwandigen, kugelförmigen Hohlkörper. Schneidet man diese Kugel in der Mitte durch, so erhält man zwei Kugelhälften. Wird in der Kugel ein Druck P aufgebaut, werden diese Kugelhälften von der Kraft $P \cdot \pi \cdot r^2$ (Druck x Fläche) auseinandergedrückt. Der sprengenden Kraft wirkt die zusammenhaltende Kraft $K \cdot 2r \cdot \pi \cdot d$ entgegen, wobei die Wandspannung K der Kraft pro Flächeneinheit des Wandquerschnitts entspricht und d die Wanddicke ist.

Setzt man die beiden Kräfte gleich, so ergibt sich:

$$P = K \cdot 2d/r \qquad \text{oder} \qquad K = P \cdot r/2d$$

Die Kraft K wird Wandspannung genannt. Über den Zeitraum der Systole ist die Wandspannung nicht konstant, da sich sowohl der Durchmesser als auch die Wanddicke des Ventrikels ändern. Das Integral der Wandspannung über den Zeitraum der Systole ist die Nachlast.

Da das Integral der Wandspannung über den Zeitraum der Systole nur schwer zu bestimmen ist, wird in der Klinik der mittlere Aortendruck als Maß für die Nachlast des Ventrikels gemessen. Im Kreislauf-Praktikum wird der Blutdruck über eine Armmanschette nach Riva-Rocci gemessen. Der mittlere Blutdruck berechnet sich dabei nach folgender Formel:

$$P = 1/3\ P_{sys} + 2/3\ P_{dia}.$$

Bei konstanter Vorlast sinkt mit steigender Nachlast das Schlagvolumen. Umgekehrt nimmt bei sinkender Nachlast das Schlagvolumen zu (s. auch Abb. 6.10).

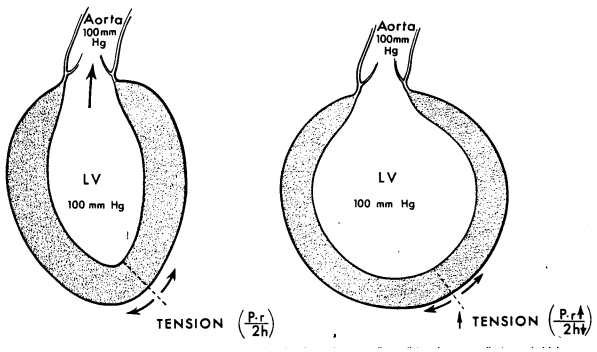


Abb. 6.11: Laplace-Beziehung für den Ventrikel

Die Laplacesche Beziehung besitzt konkrete praktische Bedeutung im Rahmen der Diagnostik bei Hypertonie. Ein Patient mit einem hohen Blutdruck und kleinem Ventrikel hat gegenüber einem Patienten mit einem dilatierten Ventrikel eine deutlich bessere Prognose, da die Wandspannung des Ventrikels niedriger ist (Abb. 6.11). Eine erhöhte Wandspannung ist immer mit einem höheren Energieverbrauch verbunden.

Merke: Zur Beurteilung der Herzfunktion ist die Druckmessung alleine nicht ausreichend. Es muss immer auch die Herzgröße beurteilt werden.

Merke: Klinisch ist eine Vorlaststeigerung durch Volumeninfusion nur in einem begrenzten Umfang sinnvoll, da mit Zunahme des Ventrikeldurchmessers auch die Nachlast des Ventrikels ansteigt.

Inotropie

Die Inotropie beschreibt das Ausmaß und die Frequenz der Querbrückenbildung zwischen Aktin- und Myosinfilamenten unabhängig von der initialen Überlappung dieser Filamente. Ein Maß für die Inotropie ist die maximale Geschwindigkeit der Verkürzung der unbelasteten kontraktilen Elemente.

Inotropie und Druck-Volumen Diagramm

Man kann sich Änderungen der Inotropie auch im Druck-Volumen-Diagramm verdeutlichen (Abb. 6.12). Eine positiv inotrope Wirkung stellt sich als eine Linksverlagerung und Versteilerung der Kurve der Unterstützungsmaxima dar. Ausgehend von einer gleichen enddiastolischen Füllung (Vorlast) kann ein größeres Schlagvolumen ausgeworfen werden. Dabei erfolgt eine stärkere Ausschöpfung des Restvolumens. Das Herz ist also zum Zeitpunkt der Endsystole kleiner. Alternativ kann aber auch ein unverändertes Schlagvolumen gegen einen höheren Druck ausgeworfen werden. Je nach der speziellen Kreislaufsituation kann also ein größeres Schlagvolumen ausgeworfen werden und/oder ein höherer Druck überwunden werden. Pharmakologisch kann dieser Effekt durch positiv inotrope Substanzen (z. B. Adrenalin/Noradrenalin) erreicht werden. Einen gegenteiligen Effekt bewirken negativ inotrope Pharmaka (z. B. Beta-Rezeptoren-Blocker).

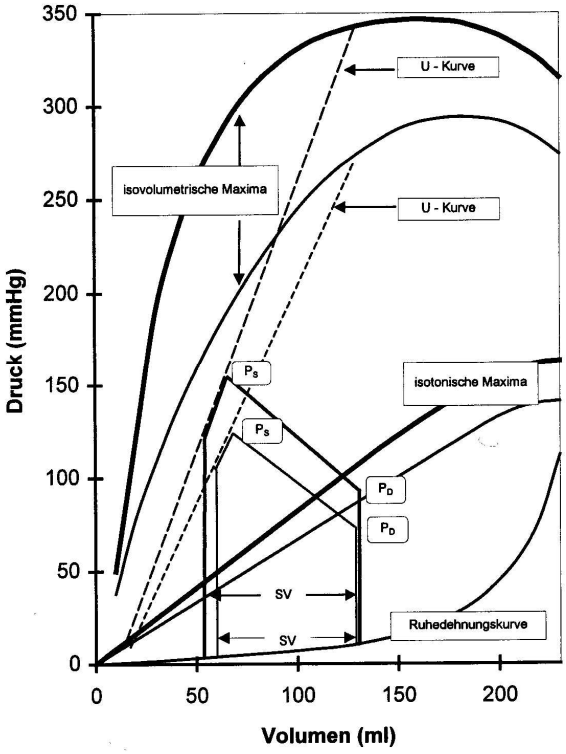


Abb. 7.12 Druck-Volumen-Diagramm bei Sympathikusaktivierung

In der Klinik wird häufig die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit (dP/dt_{max}) in der isovolumetrischen Anspannungsphase als Maß für die Inotropie bestimmt. Sie wird durch Druckmessung mit Hilfe eines Herzkatheters ermittelt und beträgt normalerweise für den linken Ventrikel in Ruhe 1500 - 2000 mmHg/s.

Herzfrequenz

Ein erhöhter Bedarf des Körpers nach Perfusion der Gewebe (z. B. bei körperlicher Arbeit) muss durch eine Steigerung des Herzzeitvolumens (HZV) gedeckt werden. Die Herzfrequenz stellt für die Größe des HZV eine wesentliche Determinante dar. Dabei führen Frequenzsteigerungen in einem geringen Rahmen zu einer Steigerung der Inotropie (Treppen- oder Staircase-Phänomen). Dies ist möglicherweise in einem Anstieg des intrazellulären Ca^{2+} begründet, da die Zeit für die Ca^{2+}-Sequestration in das sarkoplasmatische Retikulum mit zunehmender Frequenz sinkt. Allerdings ist durch die frequenzbedingte Inotropiesteigerung nur eine zusätzliche Steigerung des Herzminutenvolumens um ca. 10 % möglich. Die Steigerung der Herzfrequenz kann jedoch nur solange ein erhöhtes Herzminutenvolumen bewirken, wie genügend Zeit zur Füllung des Herzens in der Diastole zur Verfügung steht.

Bei Zunahme der Herzfrequenz wird die Diastole deutlich stärker als die Systole verkürzt.

Beispiel:

Herzfrequenz	Systolendauer	Diastolendauer	% Diastolendauer pro Herzzyklus
70/min	0,28 s	0,58 s	67
150/min	0,25 s	0,15 s	38

Die diastolische Füllung ist bei hohen Herzfrequenzen beeinträchtigt und verringert somit die Vorlast. Eine Reduktion der Vorlast reduziert wiederum das Schlagvolumen.

Strukturelle Anpassung

Wird das Herz wiederholt oder ständig einer erhöhten Arbeitsbelastung ausgesetzt, so tritt außer der funktionellen eine strukturelle Anpassung ein. Es kommt zu einer Dicken- und Längenzunahme der einzelnen Muskelfasern (Hypertrophie) mit oder ohne gleichzeitiger Erweiterung der Ventrikel. Das Gewicht des Herzens steigt dabei trotz maximaler sportlicher Belastung (Rudern, Radfahren) nur auf Werte um 350 g an und ist damit noch weit von dem kritischen Herzgewicht von ca. 500 g entfernt. Nach Beendigung der Belastung bildet sich die Hypertrophie innerhalb weniger Monate wieder zurück.

Druck-Volumen-Diagramm des linken Ventrikels

Bei einem isolierten Säugetierherzen, dessen Größe etwa der des normalen menschlichen Herzen entspricht, werden folgende Werte im linken Ventrikel gemessen:

Füllungsvolumen	Füllungsdruck	V_{min}	P_{max}
25	1,2	4	96
50	2,3	6	153
75	3,7	7	199
100	6,2	10	238
125	9,5	15	269
150	15,3	25	285
175	26,2	41	293
200	46,5	68	291
225	92,5	135	280

Zur Berechnung der Druck - Volumen - Arbeit

1 mmHg = 133 N / m^2

1 ml = 10^{-6} m^3

Abkürzungen

EDP	enddiastolischer Druck
EDV	enddiastolisches Volumen
SV	Schlagvolumen
EF	Ejektionsfraktion (SV / EDV)
P_D	diastolischer Druck in der Aorta
P_m	mittlerer Druck
P_{max}	maximaler Druck bei isovolumetrischer Kontraktion
V_{min}	minimales Volumen bei isotonischer Kontraktion
max. P_S	maximaler Druck während der Systole

Aufgabe 5: Ruhedehnungskurve, Kurven der isotonischen und isovolumetrischen Maxima

Konstruieren Sie ein P-V-Diagramm mit Ruhedehnungskurve sowie den Kurven der isotonischen und isovolumetrischen Maxima (auf Millimeterpapier DIN A4 bzw. ***Blatt 1***).

Aufgabe 6: Druck- und Volumenänderungen im linken Ventrikel für einen Herzzyklus

Tragen Sie die Druck- und Volumenänderungen im linken Ventrikel für einen Herzzyklus unter normalen Bedingungen in das P-V-Diagramm ein.

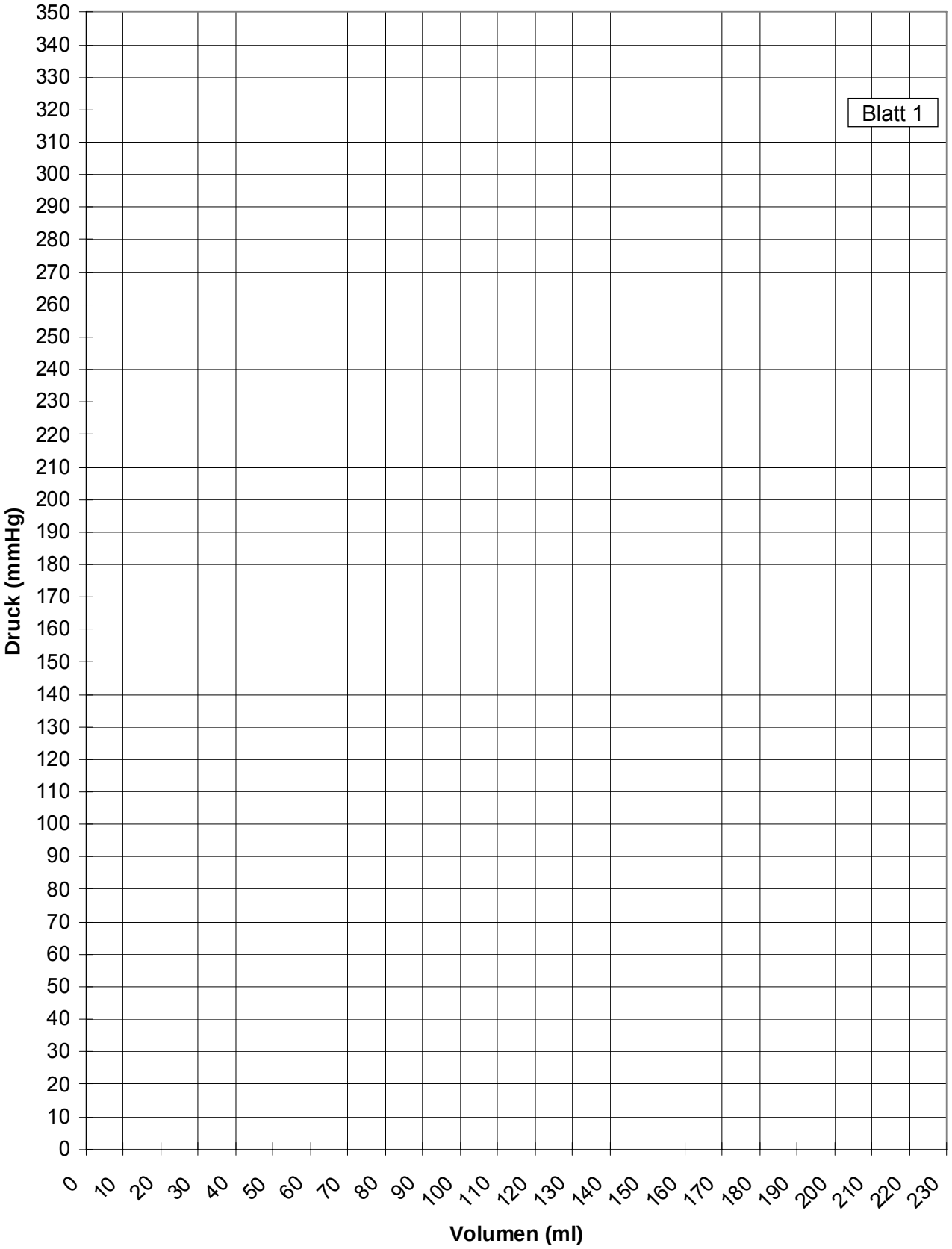
EDV	130 ml
P_D	80 mmHg
max. P_S	130 mmHg
Schluss der Aortenklappe bei	110 mmHg

Aufgabe 7: Verminderte Vorlast / erhöhte Vorlast

Konstruieren Sie im gleichen Diagramm "Druck-Volumen-Schleifen" für die Bedingungen

a) bei erniedrigter Vorlast	EDV = 80 ml
b) bei erhöhter Vorlast	EDV = 180 ml

Berücksichtigen Sie dabei die gleichen Druckwerte wie bei Aufgabe 6.


Blatt 1
Druck (mmHg)
350
340
330
320
310
300
290
280
270
260
250
240
230
220
210
200
190
180
170
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230
Volumen (ml)

Aufgabe 8: Druck-Volumen-Arbeit

Lesen Sie die zugehörigen Werte für das Schlagvolumen (SV) ab, und berechnen Sie in der unten dargestellten Tabelle die Druck-Volumen-Arbeit für den linken Ventrikel für die Bedingungen bei erniedrigter, normaler und erhöhter Vorlast nach:

$$W = (P_{m\ Austreibungsphase} - P_{m\ Füllungsphase}) \times SV \quad [\text{Arbeit } W = Nm = J]$$

Tabelle: Ergebnisse der Aufgaben 8 und 9			
EDV (ml)	80	130	180
P_D (mmHg)	80	80	80
max. P_S (mmHg)	130	130	130
Schluss der Aortenklappe (mmHg)	110	110	110
SV (ml)			
P_{mA} = mittlerer Druck in der Auswurfphase			
P_{mF} = mittlerer Druck in der Füllungsphase			
$P_{mA} - P_{mF}$ (mm Hg)			
$P_{mA} - P_{mF}$ (N / m^2)			
Druck-Volumen Arbeit: W (Nm)			
Ejektionsfraktion			

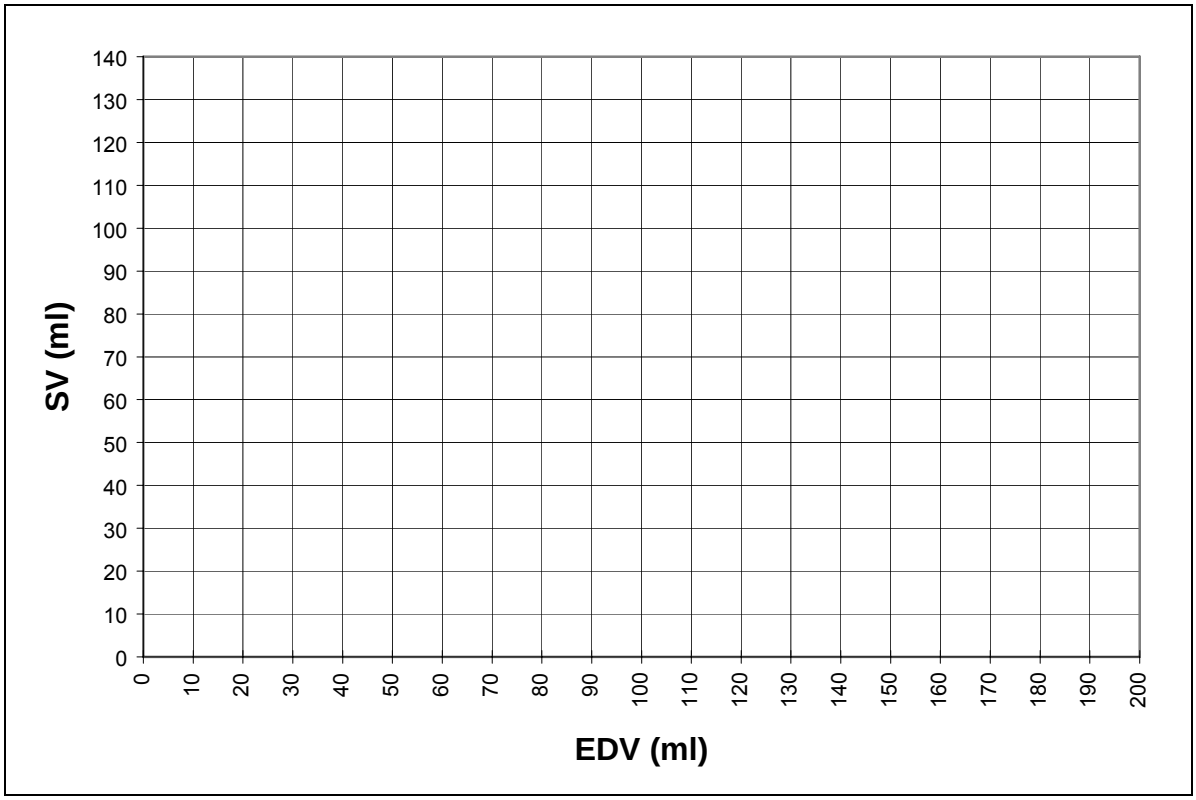
Aufgabe 9: Ejektionsfraktionen

Berechnen Sie die Ejektionsfraktionen und tragen Sie die Schlagvolumina als Funktion der vorgegebenen enddiastolischen Volumina in nachfolgender Graphik auf.

Welcher Zusammenhang lässt sich aus der Graphik ableiten?

zu Aufgaben 9 und 11:

Diagramm: Schlagvolumina als Funktion der vorgegebenen enddiastolischen Volumina



Aufgabe 10: Erhöhte Nachlast

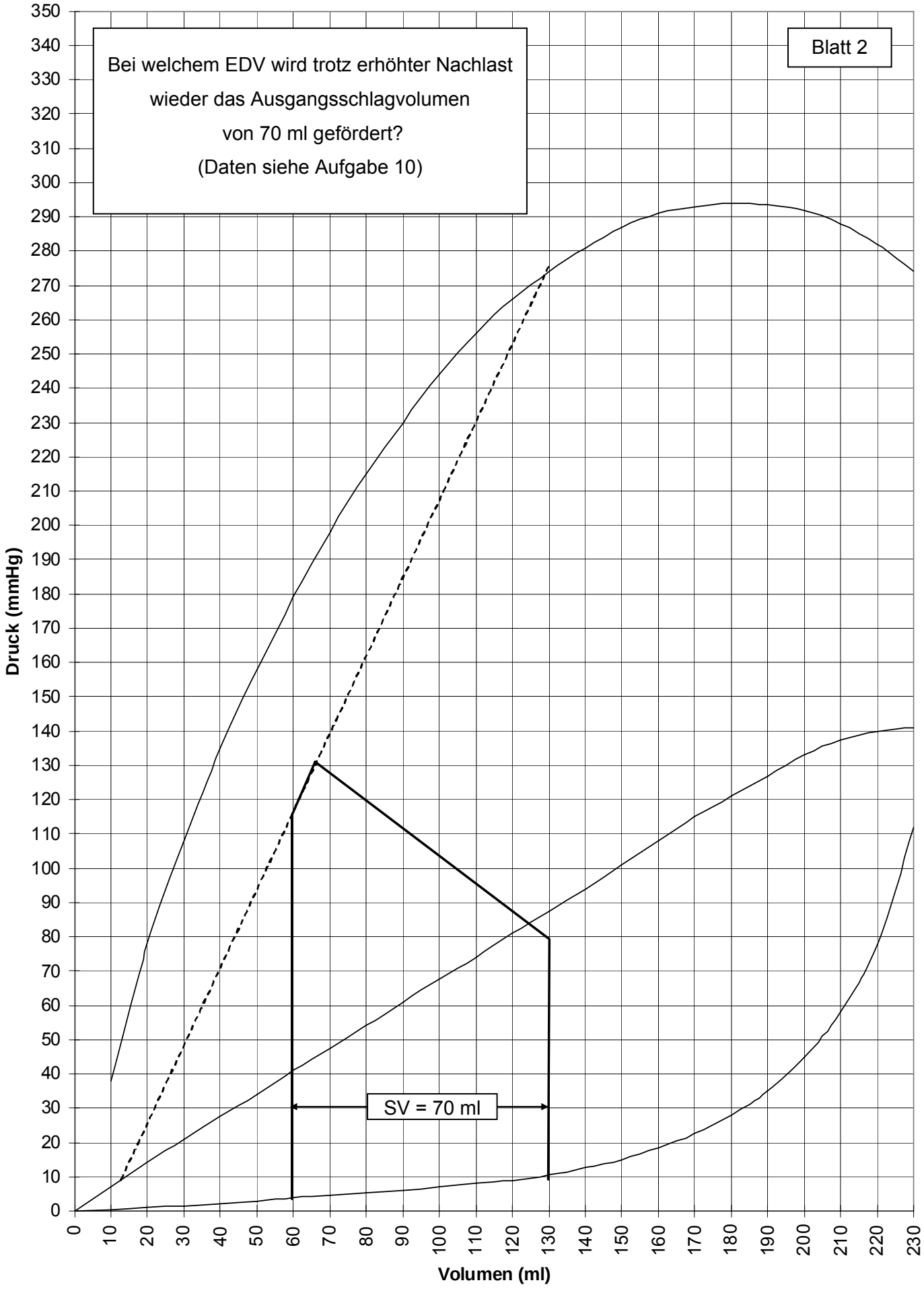
Konstruieren Sie die Druck-Volumen-Schleife für den Fall akuter Druckanpassung auf ***Blatt 2***.

- erhöhte Nachlast -

EDV	130 ml
P_D	105 mmHg
max. P_S	160 mmHg
Schluss der Aortenklappe bei	135 mmHg

Erhöhen Sie das EDV in 5-ml-Schritten, bis sich im P-V-Diagramm trotz erhöhter Druckbelastung des linken Ventrikels wieder ein SV in Höhe des Ausgangsschlagvolumens ergibt.

Das Ausgangsschlagvolumen wird gefördert bei **EDV =** **ml**


Bei welchem EDV wird trotz erhöhter Nachlast
wieder das Ausgangsschlagvolumen
von 70 ml gefördert?
(Daten siehe Aufgabe 10)
Blatt 2
Druck (mmHg)
Volumen (ml)
SV = 70 ml

Aufgabe 11: Bedingungen bei erhöhtem Sympathikotonus

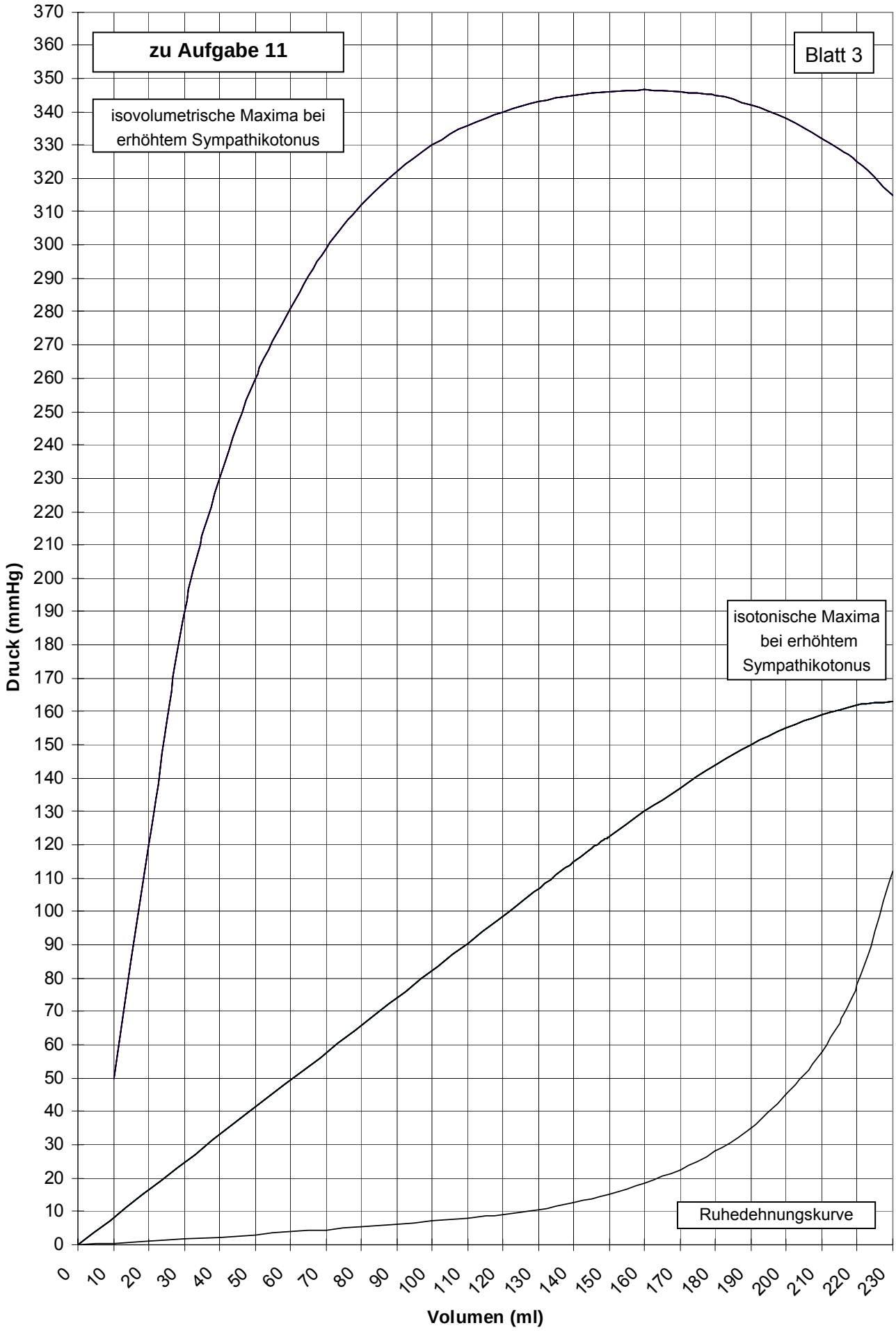
In ***Blatt 3*** sind Ihnen zusätzlich Kurven der isotonischen und isovolumetrischen Maxima für die Bedingungen bei erhöhtem Sympathicotonus vorgegeben.

Welche Schlagvolumina können unter den gegebenen Voraussetzungen bei enddiastolischen Volumina von 80 ml, 130 ml und 180 ml ausgeworfen werden?

P_D	80 mmHg
max. P_S	130 mmHg
Schluss der Aortenklappe bei	110 mmHg

Berechnen Sie die Ejektionsfraktion tragen Sie die ermittelten Schlagvolumina als Funktion der enddiastolischen Volumina in das ***Diagramm*** auf ***Seite 6.21*** ein.

EDV (ml)	80	130	180
max. P_S (mmHg)	130	130	130
Schluss der Aortenklappe (mmHg)	110	110	110
SV (ml)			
Ejektionsfraktion			


zu Aufgabe 11
Blatt 3
isovolumetrische Maxima bei erhöhtem Sympathikotonus
isotonische Maxima bei erhöhtem Sympathikotonus
Ruhedehnungskurve
Druck (mmHg)
Volumen (ml)
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 290 300 310 320 330 340 350 360 370

KREISLAUF

GK 4.1 – 4.5

Lehrbücher: Speckmann / Hescheler / Köhling, 5. Aufl., Kap. 8.2, 19
Klinke / Pape / Kurtz / Silbernagl, 6. Aufl., Kap. 6, 16.5
Schmidt / Lang, 31. Aufl., Kap. 28, 40.4

Allgemeines zum Praktikumstag

Bitte bringen Sie folgende Gegenstände zum Praktikumstag **vollständig** mit:
Skript, Schere, Lineal, Taschenrechner, Farb- und Schreibstifte, Bleistift, Klebestift,
Sportkleidung (kurze Hose, lockeres T- Shirt oder Trägertop)

Zum Bestehen des Praktikumstages wird empfohlen, das Skript sorgfältig zu lesen und die entsprechenden Kapitel in der oben aufgeführten Literatur zu erarbeiten.

Ablauf und Aufgabenverteilung

Für den heutigen Praktikumstag sollen Kleingruppen (drei bis maximal vier Studenten) gebildet werden. Es werden insgesamt sechs Aufgabenkomplexe (Stationen) bearbeitet. Die Stationen 1 bis 5 werden von den Kleingruppen selbstständig bearbeitet. Gruppe 1 beginnt bei Station 1, Gruppe 2 beginnt bei Station 2 usw. Jede Station sollte in 30 bis 45 Minuten bearbeitet werden. Es wird im Uhrzeigersinn rotiert. Sollte eine Gruppe einen Versuch schneller abschließen und der nächste Versuchsplatz noch nicht frei sein, sollte die Zeit für das sorgfältige Bearbeiten des Fragenkomplexes und das Eintragen der Versuchsergebnisse genutzt werden.

Die Aufgaben unter Punkt 6 werden als Demonstrationsversuche unter Anleitung des Praktikumsleiters durchgeführt.

Alle Aufgaben werden von allen Kleingruppen selbstständig bearbeitet und die (eigenen!) Lösungen und Ergebnisse werden sorgfältig in das Skript übertragen.

Allgemeine Grundlagen

Prinzip der Blutdruckmessung (unblutige, indirekte Messung nach Riva Rocci)

Eine aufblasbare Manschette, deren Außenseite nicht dehnbar ist, wird um eine Extremität (Oberarm) gelegt und durch einen mit Ventil versehenen Gummiballon aufgeblasen. Das Innere der Manschette ist mit einem Manometer verbunden. Da sich die aufgeblasene Manschette nicht nach außen ausdehnen kann, komprimiert sie den Arm, und zwar mit dem am Manometer abgelesenen Druck.

Wenn der Kompressionsdruck höher ist als das systolische Blutdruckmaximum in der Arterie, wird diese vollkommen zusammengedrückt, so dass kein Blut mehr hindurchströmt. Distal der Manschette kann dann kein Puls mehr getastet werden (Riva Rocci, 1896). Wenn man jetzt den Manschettendruck langsam ablässt, sinkt dieser unter den systolischen Blutdruck und Blut kann während des Druckgipfels stoßweise die

komprimierte Stelle passieren. Distal wird der Puls wieder tastbar, gleichzeitig tritt über der Arterienwand ein mit dem Stethoskop auskultierbares Geräusch auf (Korotkoff, 1906). Dieses bleibt hörbar, solange der Druck in der Oberarmmanschette zwischen systolischem und diastolischem Blutdruck liegt, die Arterie sich also während des Pulszyklus rhythmisch öffnet und schließt. Dabei ändert der Schall seinen Charakter: Unmittelbar nachdem der Manschettendruck den systolischen Blutdruck unterschritten hat, hört man einen leisen, dumpfen, niederfrequenten Ton, der bei weiterer Senkung des Manschettendruckes in ein lautes Geräusch übergeht. Erreicht der Manschettendruck den diastolischen Druckwert, so wird das Geräusch zunächst wieder dumpf, niederfrequent und verschwindet (oder wird zumindest erheblich leiser), sobald der Manschettendruck den diastolischen Blutdruck unterschreitet.

Die Messwerte des systolischen und diastolischen Blutdrucks sind also durch das Auftreten oder das Verschwinden bzw. die Dämpfung dieser Schallerscheinung definiert. Die Messung nach diesem Prinzip setzt allerdings voraus, dass sich der Luftdruck der Manschette durch das weiche Gewebe voll überträgt, und dass die Arterienwand selbst der Kompression keinen Widerstand entgegensetzt. Diese Bedingungen können bei Beachtung der Messvorschriften normalerweise mit genügender Näherung als erfüllt gelten.

Ursache des Geräusches ist die durch den Druck unter der Manschette erzeugte Stenose der Arterie, deren Querschnitt sich distal der Manschette wieder erweitert. Infolgedessen geht an dieser Stelle beim Öffnen während der Pulswelle die (im Beginn noch laminare) Strömung in eine turbulente über, die das hörbare Geräusch erzeugt. Sobald die Arterie beim Unterschreiten des diastolischen Manschettendruckes ständig offen bleibt, geht die turbulente Strömung wieder in eine laminare Strömung über.

Im Bereich zwischen systolischem und diastolischem Manschettendruck kommt es außerdem im Manometer zu einer Verstärkung der (von der Arterie über die Weichteile in den Manschettenraum übertragenen) pulssynchronen Druckschwankungen sowie im Arm der untersuchten Person zu einer klopfenden Empfindung (als Hilfskriterien der Blutdruckmessung verwendbar).

Verfahren der Blutdruckmessung

Zur Blutdruckmessung wird eine entleerte Manschette um den Oberarm gelegt, deren Unterrand etwa 2 cm oberhalb der Ellenbeuge enden sollte. **Die Manschette soll in ihrer Breite etwa dem halben Umfang des Oberarmes entsprechen**. In der Praxis wird bei einem Oberarmumfang von weniger als 40 cm die "übliche" Manschette von 12 cm verwendet. Bei Patienten mit einem Oberarmumfang größer als 40 cm muss eine 18 cm breite Blutdruckmanschette benutzt werden.

Unabhängig von der Körperstellung soll sich die Ellenbeuge bei der Messung etwa in Herzhöhe befinden. **Der Arm soll möglichst entspannt sein und wird dazu zweckmäßigerweise mit dem Unterarm aufgelegt** (Muskelspannung im Oberarm fängt einen Teil des Manschettendruckes ab, so dass die Drücke zu hoch bestimmt werden). Der Arm soll außerdem nicht überstreckt werden (sonst möglicherweise zusätzliche Stenose der Arterie, die zu Fehlmessungen führt). **Unter Palpation (Tasten) der Arteria radialis wird die Manschette rasch etwa 4 kPa (30 mmHg) über den systolischen Druck aufgepumpt**, wobei das Verschwinden des Pulses in der Arteria radialis als Hinweis für den systolischen Druck gewertet wird.

Der Puls wird nun mit zwei oder drei Fingern (nicht mit dem Daumen!) über der Arteria radialis auf der radialen Seite des Unterarmes kurz oberhalb des Handgelenkes palpiert. Stethoskop in der Ellenbeuge leicht auf die Arterie aufsetzen (festeres Aufsetzen erzeugt eine Stenose, die Gefäßgeräusche hervorrufen kann und zu falschen Messungen führt). Mit der am Manometer vorhandenen Regulierschraube den Druck in der Manschette senken. Die Druckabfallgeschwindigkeit soll so gewählt werden, dass der Druck nicht schneller als 270 - 400 Pa/s (ca. 2 - 3 mmHg/s) absinkt. Am Manometer ablesen, bei welchem Druck der erste und bei welchem der letzte Ton zu hören ist.

Bei häufigen Messungen darf der Abstand zwischen zwei Messungen nicht kleiner als etwa 1 min werden. Es tritt sonst eine Stauung im Arm auf, weil die Zeit zu kurz wird, um das während einer Messung gestaute Blut abfließen zu lassen. Aus diesem Grund auch sofort nach Erreichen des diastolischen Druckes den Druck völlig aus der Manschette ablassen.

Die Pulsfrequenz wird während jeweils 15 s gezählt und auf die Minute umgerechnet.

Die Palpation des Radialispulses während des Aufpumpens der Manschette ist zwingend notwendig, um den Zieldruck der Manschette beim Aufblasen nicht zu weit übersystolisch aufzupumpen. Dies ist nicht nur schmerzhaft für den Probanden, es führt auch zu falsch hohen Blutdruckwerten. Ebenso ist ein zu geringes Aufpumpen der Manschette zu vermeiden. In diesem Zusammenhang ist der Begriff der auskultatorischen Lücke zu erwähnen. Hierbei handelt es sich um ein so genanntes Resonanzphänomen, bei dem die Korotkoff-Töne in ihrem hörbaren Bereich innerhalb einer individuell unterschiedlichen Druckspannung plötzlich nicht mehr auskultiert werden können. Wird der Aufpumpdruck der Manschette nun zu niedrig gewählt und fällt gerade in diese akustisch leere Phase, werden zwangsläufig falsch niedrig systolische Werte ermittelt, da die zunächst hörbaren Korotkoff- Töne an der Untergrenze der auskultatorischen Lücke als systolischer Grenzwert fehlinterpretiert werden. Bei ausreichendem Manschettendruck und zu schnellem Entlüften kann es aufgrund der auskultatorischen Lücke zu einer falsch hohen Bestimmung der Diastole kommen. Sollte der Messende die auskultatorische Lücke als Diastole bestimmen und die Manschette schnell entlüften, wird er das mögliche erneute Einsetzen der Korotkoff-Töne nicht mehr hören. Somit ist der gemessene diastolische Wert höher als der tatsächliche Wert.

Station 1: Orthostatische Kreislaufreaktion beim passiven und aktiven Aufstehen

Aufgabe:

Hier soll die kurzfristige Kreislaufregulation bei aktivem und passivem Aufstehen untersucht werden. Die orthostatische Kreislaufreaktion soll beobachtet und die Unterschiede zwischen aktivem und passivem Aufstehen herausgearbeitet werden.

Stichworte:

Systolischer- und diastolischer Blutdruck. Normwerte des Blutdrucks und der Herzfrequenz, Orthostase, kurzfristige Kreislaufregulation, orthostatische Dysregulation.

Geräte:

Blutdruckmessgerät, bestehend aus Manschette, Gummiballon und Quecksilbermanometer; Stethoskop; Stoppuhr; Liege; Kippliege (motorgetrieben).

1a) Orthostatische Kreislaufreaktion beim passiven Aufrichten (Kippliege)

Ein Student legt sich auf die Kippliege. Ein weiterer Teilnehmer misst Blutdruck und Pulsfrequenz, jeweils im Abstand von 2 Minuten, bis sich konstante Werte eingestellt haben (Ruhezeit mindestens 10 Minuten).

Daraufhin wird die Versuchsperson mit Hilfe der Kippliege (motorisch angetrieben) so schnell wie möglich aufgerichtet. **Achtung! Am Fußende der Liege muss ein Mitglied der Gruppe sicherstellen, dass die Versuchsperson aufgrund eines orthostatischen Blutdruckabfalls nicht nach vorne fällt!** Die oben genannten Werte werden weiterhin notiert, und zwar nach Beendigung des Aufrichtens noch weitere 10 min. Die während des Kippvorgangs erhaltenen Messwerte werden markiert. Nach Ablauf dieser 10 min wird die Liege wieder so schnell wie möglich in die waagerechte Position gebracht. Alle Messungen laufen dabei analog zum Aufrichten ab. Nach Erreichen der waagerechten Position bleibt die Versuchsperson

weitere 10 min liegen und es wird wie bisher Blutdruck und Herzfrequenz gemessen. Nach Ablauf dieser Zeit ist Teil a) von Station 1 beendet, die Versuchsperson bleibt aber auf der Liege liegen, um Teil b) direkt im Anschluss durchführen zu können.

Bitte tragen Sie alle Ergebnisse in die unten stehenden Tabellen ein.

Horizontal		**0 min**	**2 min**	**4 min**	**6 min**	**8 min**	**10 min**
Blut-druck	**systolisch**						
	diastolisch						
Herzfrequenz							

Vertikal		**0 min**	**2 min**	**4 min**	**6 min**	**8 min**	**10 min**
Blut-druck	**systolisch**						
	diastolisch						
Herzfrequenz							

Horizontal		**0 min**	**2 min**	**4 min**	**6 min**	**8 min**	**10 min**
Blut-druck	**systolisch**						
	diastolisch						
Herzfrequenz							

1b) Orthostatische Kreislaufbelastung beim aktiven Aufstehen

In diesem Versuchsabschnitt wird die letzte Ruhephase der orthostatischen Kreislaufbelastung beim passiven Aufstehen als Ruhephase für diese Teilaufgabe genutzt. Die Versuchsperson bleibt nach Aufgabenteil a also ruhig auf der Untersuchungsliege liegen, bis die Kreislaufparameter sich normalisiert haben. Dann steht die Versuchsperson - mit noch angelegter Blutdruckmanschette - schnell auf und bleibt dann ruhig und völlig entspannt stehen. **Vorsicht bei Probanden mit niedrigem Blutdruck oder bekannter orthostatischer Dysregulation!** Sofort nach dem Aufstehen und dann im Abstand von jeweils 2 Minuten wird wieder Blutdruck und Pulsfrequenz gemessen, bis eine Stehdauer von 10 Minuten erreicht ist. Während dieser Zeit soll sich die Versuchsperson nicht bewegen, auch nicht das Gewicht von einem Bein auf das andere verlagern.

Hier soll jeder Teilnehmer die Ergebnisse seiner Teilgruppe protokollieren.

	vor dem Aufstehen			**nach dem Aufstehen**					
				0 min	**2 min**	**4 min**	**6 min**	**8 min**	**10 min**
Systolischer Blutdruck									
Diastolischer Blutdruck									
Herzfrequenz									

Bitte stellen Sie die Ergebnisse beider Teilversuche auch in Form eines Diagramms dar und benutzen Sie unten stehende Symbole. Zur besseren Abgrenzung der einzelnen Aufstehversuche benutzen Sie bitte zwei verschiedene Farben. Versuch a zum Beispiel grün, Versuch b in schwarz.

o systol. Druck • diastol. Druck x Herzfrequenz

Blutdruck und Herzfrequenz als Funktion der Zeit (Diagramm)

Bitte zeichnen Sie zunächst Ordinate und Abszisse ein und beschriften Sie diese Achsen entsprechend

Abschließend beantworten Sie bitte folgende Fragen stichpunktartig:

1. Charakterisieren Sie die Umverteilung des Blutvolumens bei Orthostase. Welche Auswirkungen hat diese Umverteilung? Welche Gegenregulationen werden ausgelöst?

2. Erklären Sie die Mechanismen der kurzfristigen Kreislaufregulation, die bei einer orthostatischen Kreislaufbelastung bedeutsam sind.

3. Frau H. liegt gerade entspannt auf der Couch. Da fällt ihr ein, dass sie in der Waschküche das Bügeleisen angelassen hat. Sie springt von der Couch auf. Urplötzlich wird ihr schwindelig und schwarz vor Augen, so dass sie sich schnell zurück auf die Couch fallen lassen muss.
   Was ist die wahrscheinlichste Ursache für Frau H.s Symptome? Erklären Sie die pathophysiologischen Zusammenhänge.

Station 2: Arbeitsbelastung an der Kletterstufe

Aufgabe:

Indirekte Messung des arteriellen Blutdrucks und der Pulsfrequenz am Menschen vor, während und nach definierter Belastung mittels Kletterstufe.

Stichworte:

Systolischer Blutdruck, diastolischer Blutdruck, indirekte und direkte Blutdruckmessung, Normalwerte des Blutdrucks und der Herzfrequenz, Anpassung des Kreislaufs an körperliche Arbeit, Herzminutenvolumen.

Geräte:

Kletterstufe; Metronom; Blutdruckmessgerät, bestehend aus Manschette, Gummiballon und Quecksilbermanometer; Stethoskop; Computer; ADINSTRUMENTS-Brustgurt; Stoppuhr; Liege.

Messprinzip:

Die Kletterstufe (nach Kaltenbach und Klepzig) bietet eine Möglichkeit, mit einfachen Mitteln eine gut dosierbare und reproduzierbare Arbeitsbelastung vorzunehmen. Die Versuchsperson steigt dabei nach dem Takt eines Metronoms eine in der Höhe einstellbare Stufe hinauf und hinab, wobei sie sich an den Sprossen eines Haltegriffs emporzieht, neben den Beinen also auch die Arme zur Arbeitsbelastung mitbenutzt.

Aus der im Praktikum aushängenden Tabelle werden Stufenhöhe und Metronomfrequenz so gewählt, dass unter Berücksichtigung des Körpergewichtes die Versuchsperson in den ersten vier Minuten der Belastung eine Leistung von 7,5 mkp/s (= 78 W) erbringt. Die Versuchsperson übt erst einige Takte an der Kletterstufe bis sie den Schrittzyklus beherrscht.

Eine Hilfsperson stellt dabei das Plastikplättchen über dem Haltegriff so ein, dass die Versuchsperson mit ihrem Kopf bei aufrechter Stellung auf der Kletterstufe das Plättchen gerade berührt. Durch diese Kontrolle wird sichergestellt, dass sie die volle Arbeit erbringt und nicht durch fehlende Streckung des Knie- und Hüftgelenks weniger leistet (Protokoll auf Seite 7.9).

Versuchsablauf:

Vor dem Test ruht die Versuchsperson zunächst mindestens 9 Minuten auf der Liege. Während dieser Ruhephase werden Blutdruck und Herzfrequenz im Abstand von 2 Minuten gemessen. Mindestens 3 Blutdruckwerte aus dieser Ruhephase werden auf Seite 7.9 protokolliert. Die Versuchsperson stellt sich vor die Kletterstufe, ergreift mit beiden Händen die etwa in Augenhöhe befindliche Sprosse des Haltegriffes und steigt nach dem Takt des Metronoms die Kletterstufe auf und ab, wobei sie sich beim Aufstieg gleichzeitig mit den Armen hochzieht. Ein Schrittzyklus umfasst dabei vier Metronomschläge:

I Aufsetzen des rechten oder linken Beines auf die Kletterstufe,

II Hochziehen bis zum vollständigen Stand auf beiden Beinen,

III Absteigen nach rückwärts mit dem ersten Bein,

IV Nachsetzen des anderen Beines bis zum vollen Stand.

Das Treppensteigen wird 8 Minuten ununterbrochen durchgeführt. Nach 4 Minuten wird eine Steigerung der Taktfrequenz um sieben Schläge pro Minute vorgenommen.

Während der Belastung an der Kletterstufe wird die Herzfrequenz der Versuchsperson kontinuierlich mit Hilfe des ADINSTRUMENTS-Brustgurts und des Computers aufgezeichnet. Am Ende der Belastung wird die Aufzeichnung gestoppt und die Herzfrequenz der Versuchsperson an den Zeitpunkten 0, 2, 4, 6 und 8 min der Belastung bestimmt, indem die Herzschläge innerhalb von 15 sec gezählt und mit vier multipliziert werden. Die Werte werden in der Tabelle notiert. Unmittelbar nach der Belastung werden der Blutdruck und die Herzfrequenz der Versuchsperson, die sich wieder auf die Liege gelegt hat, gemessen. Diese Messungen werden während der folgenden Erholungsphase von 10 Minuten alle 2 Minuten wiederholt.

Arbeitsbelastung an der Kletterstufe

Hier soll jeder Teilnehmer die Ergebnisse seiner Teilgruppe protokollieren.

Vor der Belastung		**I**	**II**	**III**
Blut-druck	**systolisch**			
	diastolisch			
Herzfrequenz				

Während der Belastung	**0 min**	**2 min**	**4 min**	**6 min**	**8 min**
Herzfrequenz					

Nach der Belastung		**0 min**	**2 min**	**4 min**	**6 min**	**8 min**	**10 min**
Blut-druck	**systolisch**						
	diastolisch						
Herzfrequenz							

Bitte stellen Sie diese Ergebnisse auch in Form eines Diagramms dar und benutzen Sie folgende Symbole:

o systol. Druck • diastol. Druck x Herzfrequenz

Blutdruck und Herzfrequenz als Funktion der Zeit (Diagramm):

Bitte beantworten Sie folgende Fragen stichpunktartig:

1. Wie ist das Herzzeitvolumen definiert und warum steigt das Herzzeitvolumen bei körperlicher Arbeit an? Was versteht man unter sympathischer Mitinnervation?

2. Welche Möglichkeiten der Messung des Herzzeitvolumens kennen Sie?

3. Welche Organe werden bei körperlicher Arbeit weniger oder vermehrt durchblutet? Und was sind die Ursachen?

Station 3: Messung von Blutdruck und Pulsfrequenz an oberer und unterer Extremität

Aufgabe:

Indirekte Messung des arteriellen Blutdrucks und der Pulsfrequenz an der oberen und unteren Extremität, häufige Fehlerquellen bei der Blutdruckmessung. Bestimmung des sogenannten AB-Index (Knöchel-Arm-Index).

Stichworte:

Systolischer Blutdruck, diastolischer Blutdruck, mittlerer arterieller Blutdruck, Blutdruckamplitude, laminare und turbulente Strömung, indirekte und direkte Blutdruckmessung, Normwerte des Blutdrucks und der Herzfrequenz, respiratorische Arrhythmie, langfristige Kreislaufregulation.

Lage der Arteria tibialis posterior, Lage der Arteria dorsalis pedis (siehe Lehrbücher für Anatomie), systolischer Blutdruck, diastolischer Blutdruck, Knöchel-Arm-Index.

Geräte:

Blutdruckmessgerät, bestehend aus Manschette, Gummiballon und Quecksilbermanometer; Stethoskop; Stoppuhr; Liege; Computer; ADINSTRUMENTS Powerlab mit Pulsaufnehmer.

3a) Messung des Blutdrucks und der Herzfrequenz im Liegen; Atemabhängigkeit der Pulsfrequenz und Pulsqualität

In jeder Gruppe werden an einem der Partner Blutdruck und Herzfrequenz mindestens dreimal im Sitzen gemessen und von dem Praktikumsteilnehmer, der die Messung durchgeführt hat, protokolliert.

Lassen Sie den Probanden tief ein- und ausatmen. Tasten Sie den Puls und prüfen Sie dessen Atemabhängigkeit. Protokollieren Sie das Ergebnis.

Mehrfachmessung von Blutdruck und Herzfrequenz

	Blutdruck systolisch/diastolisch	**Herzfrequenz**	**Bemerkungen Versuchsperson**
Messung 1			
Messung 2			
Messung 3			

Statistik:

Atemabhängigkeit der Pulsfrequenz und Pulsqualität

Inspiration:

Exspiration:

Pulsqualität: durus – mollis; magnus – parvus;

3b) Einfluss einiger häufig gemachter Fehler auf die Blutdruckmessung

i) Einfluss der Lage des Oberarmes relativ zum Herzen

Der Blutdruck der Versuchsperson wird im Sitzen gemessen. Dazu ruht der Unterarm entspannt auf den Oberschenkeln, so dass sich die Manschette etwa auf Herzhöhe befindet.

Nach einer Pause von ca. 1 min wird der Arm senkrecht nach oben gestreckt. Es wird dabei eine Hilfestellung durch einen weiteren Teilnehmer geleistet, der den Arm des Probanden am Handgelenk über Kopfhöhe festhält. Es erfolgt eine Blutdruckmessung; die Manschette liegt hierbei 30 - 40 cm über Herzhöhe. Ergebnisse in unten stehender Tabelle protokollieren.

ii) Einfluss der Manschettenbreite

Der Blutdruck wird zunächst mit einer Normalmanschette (Breite 12 cm), dann mit einer schmaleren Manschette (für geringen Oberarmumfang) und mit einer breiteren Manschette (für besonders hohen Oberarmumfang) gemessen. Blutdruck-Messergebnisse zusammen mit dem Umfang des Oberarms der Versuchsperson in unten stehender Tabelle protokollieren.

Oberarmumfang: cm

	Wert 1	**Wert 2**	**Wert 3**	**Mittelwert ± Standardabw.**
1. Kontrolle (entspannter Arm)				
erhobener Arm				
2. Normalmanschette (12 cm)				
schmale Manschette (cm)				
breite Manschette (cm)				

3c) Bestimmung des AB-Index

Grundlagen AB-Index

Die periphere arterielle Verschlusskrankheit (pAVK) ist definiert als stenosierende und okkludierende Veränderungen der Aorta und Extremitätenarterien. Sie betrifft in > 90 % der Fälle die untere Extremität und wird in > 95 % der Fälle durch Arteriosklerose verursacht. Etwa 3 % der über 60- jährigen leiden unter einer symtomatischen pAVK Die Bestimmung des Ankle-Brachial-Index (AB-Index) gibt Auskunft über den Schweregrad der pAVK.

Der sogenannte ABI-Index ist eine einfache, nichtinvasive und zuverlässige Methode zur Erfassung einer peripheren arteriellen Verschlusskrankheit. Dazu wird der systolische Blutdruck oberhalb des Knöchels (Ankle) gemessen und durch den systolischen Blutdruck des Oberarmes (Brachial) geteilt. Als normwertig wird ein Index zwischen 0,9 und 1,2 angesehen.

Neben der Diagnosebestätigung und der Bestimmung des Schweregrades der pAVK hat sich gezeigt, dass ein ABI von < 0,9 ein guter Vorhersageparameter für das Auftreten von späteren kardiovaskulären Komplikationen ist.

Normwerte des AB-Index

AB-Index	Aussage
0,9 - 1,2	Normwert
0,75 - 0,9	leichtgradige pAVK
0,5 - 0,75	mittelschwere pAVK
< 0,5	kritische Ischämie

Durchführung:

Ein Proband zieht beidseitig Schuhe und Strümpfe aus, setzt sich auf einen Stuhl und legt die Füße auf einen gegenüberliegenden Stuhl. Nun werden von einem weiteren Teilnehmer beidseits die Fußpulse gesucht. Bitte achten Sie darauf, die Arterien nicht zu fest zu palpieren. Sie können sonst unter Umständen den Puls nicht fühlen.

An der Arterie, die am besten zu tasten war wird nun der Pulsaufnehmer des ADINSTRUMENTS Powerlabs aufgesetzt und das Band leicht angezogen. Auch hier gilt, dieses nicht zu fest anzuziehen. Bitte kontrollieren Sie auf dem Monitor die korrekte Lage des Pulsaufnehmers. Es sollten nun deutliche Pulswellen zu sehen sein.

Der Pulsaufnehmer ist an das ADINSTRUMENTS Powerlab angeschlossen. Nun wird ein neues Projekt geöffnet (siehe Beschreibung an der Station). Die Geschwindigkeit wird unten links auf 5:1 eingestellt. Die Eingangsempfindlichkeit ist für die Registrierung entsprechend eingestellt und kann bei Bedarf rechts oben für den Kanal separat nachjustiert werden (siehe Bild). Es hat sich gezeigt, dass in der Regel eine Einstellung auf 200 mV sinnvoll ist.

Abschließend wird nun die Blutdruckmanschette zwei Fingerbreit oberhalb des Knöchels angelegt. Nun soll ein Teilnehmer die Manschette bis etwa 20 mmHg oberhalb der letzten sichtbaren Pulswelle aufpumpen. Nun wird die Manschette langsam entlüftet. Der dritte Teilnehmer gibt die erste sichtbare Pulswelle an, so dass der zweite Teilnehmer nun den systolischen Blutdruck bestimmen kann. Der Wert wird notiert und der Proband kann sich wieder Strümpfe und Schuhe anziehen.

Der systolische Blutdruck am Oberarm wird im Sitzen gemessen. Der Wert wird notiert.

Berechnungen:

Systolischer Blutdruck Knöchel: _____ mmHg

Systolischer Blutdruck Oberarm: _____ mmHg

$$\text{AB} - \text{Index} = \frac{\text{Systolischer Blutdruck Knöchel}}{\text{Systolischer Blutdruck Oberarm}}$$

$$\text{AB} - \text{Index} = \frac{\text{mmHg}}{\text{mmHg}} = \_\_\_\_\_$$

Abschließend beantworten Sie bitte folgende Fragen stichpunktartig

1. Wie sind die Blutdrucknormwerte bei Erwachsenen? Welche Ursachen der Hypertonie kennen Sie?

2. Warum sollte man grundsätzlich die Blutdrücke an beiden Armen messen?

3. Erklären Sie den Begriff der respiratorischen Arrhythmie und ihre Ursache.

4. Erklären Sie die Blutdruckmesswerte, die Sie bei Aufgabe 3b erhoben haben.

5. Was versteht man unter der so genannten Druckdiurese?

Station 4: Simultane Registrierung der Druckpulswelle und der Herztöne

Aufgaben:

Registrierung der Pulswelle an der A. carotis und der A. prinzeps pollicis sowie Berechnung der arteriellen Pulswellengeschwindigkeit. Vergleichende, zeitgleiche Registrierung des Phonokardiogramms im Liegen.

Stichworte:

Druckpuls, Strompuls, Pulswelle, Pulswellengeschwindigkeit, Windkessel, Herztöne, Aukultationsstellen, Projektion der Herzklappen auf die Brustwand (Vergleiche Lehrbücher der Anatomie), Phonokardiogramm. Blutdruckschwankung 1., 2. und 3. Ordnung. Frank-Starling-Mechanismus.

Geräte:

Computer; ADINSTRUMENTS Powerlab mit Pulsaufnehmern und Herzmikrophon; Maßband.

Messprinzip:

Die beiden Pulsaufnehmer sind mechano-elektrische Wandler nach dem piezo-elektrischen Prinzip: Ein Kristall gibt eine der Druckbelastung proportionale Spannung ab, die verstärkt und registriert wird.

Durchführung:

Der periphere Pulsaufnehmer wird so am rechten Daumen befestigt, so dass das Zentrum der Abnahmefläche auf der A. prinzeps pollicis liegt.

Durch Palpation dann die Lage der A. carotis feststellen. Den Carotis-Pulsaufnehmer mit der Fühlerseite auf die Carotis aufsetzen. Dabei darauf achten, dass der Abnehmer möglichst weit peripher (d. h. kopfwärts) sitzt. Befestigungsgurt um den Hals legen und leicht anziehen.

Die beiden Pulsaufnehmer sind an das ADINSTRUMENTS Powerlab angeschlossen. Nun wird ein neues Projekt geöffnet (siehe Beschreibung an der Station). Die Geschwindigkeit wird unten links auf 5:1 eingestellt. Die Aufzeichnungsempfindlichkeit ist für die Registrierung entsprechend eingestellt und kann bei Bedarf rechts oben für jeden Kanal separat nachjustiert werden (siehe Beschreibung an der Station). Es hat sich gezeigt, dass in der Regel eine Einstellung auf 200 mV sinnvoll ist.

Für eine einwandfreie Registrierung ist die richtige Befestigung der Pulsaufnehmer entscheidend. Diese muss experimentell durch Verändern der Position und des Auflagedruckes (durch Anziehen oder Lockern der Befestigungsgurte) herausgefunden werden. Dazu die Registrierung mit langsamer Geschwindigkeit laufen lassen und ab und zu die Geschwindigkeit zur genaueren Beurteilung kurz erhöhen.

Zur Registrierung der Herztöne wird ein empfindliches Mikrofon auf den ERBschen Punkt aufgesetzt. Nach Vorverstärkung und gehörähnlicher Filterung werden die Signale aufgezeichnet.

Messung 4a:

Für die erste Messung wird die Versuchsperson aufgefordert, ruhig auszuatmen und dann den Atem anzuhalten. Während dieser Zeit werden mindestens fünf Herzzyklen registriert. Zur Berechnung findet man am unteren Rand der Aufzeichnung die Sekunden. Anschließend wird an der Versuchsperson der ungefähre Abstand der Registrierstelle am Daumen (A_D) sowie der Registrierstelle an der Carotis (A_C) von der Herzbasis aus (Mitte des Brustbeins auf der Höhe des 2. ICR) gemessen.

Anschließend drucken Sie den Bereich Ihrer Messung, der sich für die Auswertung besonders gut eignet (mind. fünf Herzzyklen) für jedes Mitglied Ihrer Kleingruppe einmal aus und nehmen Sie die Auswertung vor.

Bitte achten Sie beim Drucken darauf, dass
nicht ALLE Seiten der Registrierung ausgedruckt werden sollen!

Markieren Sie dazu die Herzzyklen, die Sie auswerten möchten mit der linken Maustaste und der Shift-Taste in jedem der aufgezeichneten Signale. Es wird dann nur der markierte Bereich gedruckt. Kontrollieren Sie dies bitte vorher in der Druckvorschau (Print Preview).

Messung 4b:

Bei der zweiten Messung wird die Versuchsperson aufgefordert, ruhig zu atmen. Auf Kommando eines zweiten Teilnehmers soll der Proband dann langsam tief ein- und ausatmen. Ab hier sollen wieder mindestens 5 Herzzyklen registriert werden. Nach Abschluss der fünf Herzzyklen soll der Proband wieder normal weiteratmen.

Ergebnisnachweis:

Jeder Praktikumsteilnehmer soll Registrierbeispiele aller Messungen bekommen und selbst auswerten. Dokumentieren Sie die Ergebnisse auf Seite 7.18. Jeder Studierende soll eine Originalregistrierung mit Markierung der Messpunkte auf Seite 7.19 nachweisen.

Bitte beachten Sie, dass die oberste Registrierung (Kanal 1) der Phonokardiographie entspricht, die zweite Registrierung (Kanal 2) die Druckpulskurve des Daumens ableitet und die unterste Registrierung (Kanal 3) die Druckpulskurve der A. carotis darstellt.

Berechnung der Pulswellengeschwindigkeit in der Armarterie

Die Pulswellengeschwindigkeit ergibt sich aus dem Quotienten der Differenz der Entfernung der beiden Messstellen zur Herzbasis in m und der Zeitdifferenz der Pulswellen in s.

$$V = \frac{A_D - A_C}{\Delta t} (m \cdot s^{-1})$$

V = Pulswellengeschwindigkeit
A_D = Entfernung Daumen/Herzbasis
Ac = Entfernung Carotis/Herzbasis
Δt = Zeitdifferenz

Registrierbeispiel mit Markierung der Messpunkte zur Ermittlung der Zeitdifferenz zwischen beiden Pulskurven

Als Zeitdifferenz wird der Mittelwert aus 5 Messungen verwendet.

Δt_1	
Δt_2	
Δt_3	
Δt_4	
Δt_5	

$(\overline{\Delta t})$ =

A_D =

A_C =

$V = \frac{\qquad}{\qquad} \; (m \cdot s^{-1})$

Kleben Sie hier eine Originalregistrierung der simultanen Aufnahme von Phonokardiogramm und Druckpulskurven ein.

Bezeichnen Sie die registrierten Kurven!

Abschließend beantworten Sie bitte folgende Fragen stichpunktartig

1. Welche Rückschlüsse lassen sich aus der Messung der Pulswellengeschwindigkeit gewinnen?

2. Wie verändert sich die Pulswellengeschwindigkeit im Alter, beziehungsweise bei kardiovaskulären Erkrankungen?

3. Welche Veränderung der Druckpulskurve haben Sie bei tiefer Inspiration beobachtet? Erklären Sie die physiologischen Zusammenhänge.

4. Erläutern Sie das Prinzip der Blutdruckschwankungen 1., 2. und 3. Ordnung. Welche Mechanismen liegen hier zugrunde?

Station 5: Kreislaufmodelle

Stichworte:

Totaler peripherer Widerstand, Ohmsches Gesetz, Compliance, Elastance, Wandspannung, Transmuraler Druck, Schubspannung, Viskosität, turbulente und laminare Strömung, Reynold-Zahl, Windkessel, Hagen-Poiseuille-Gesetz, Zusammenhang zwischen Stromstärke, Strömungsgeschwindigkeit und Querschnitt.

Aufgabe:

Nachfolgend werden Ihnen zwei Fallbeispiele vorgestellt, anhand derer Sie die physikalischen Grundlagen für dieses Praktikum erarbeiten sollen. Erklären und erläutern Sie schriftlich.

Fallbeispiel 1:

Bei einem 64-jährigen Patienten zeigten bei der körperlichen Untersuchung sich eine arterielle Hypertonie (Bluthochdruck) und ein Herzgeräusch über der Aortenklappe. Bei der nachfolgenden transthorakalen Echokardiographie zeigen sich eine deutliche Aortenklappenstenose und eine Aortensklerose.

Mit welchen hämodynamischen Veränderungen ist nun zu rechnen? In welcher Herzphase erwarten Sie das Herzgeräusch?

Lösung Fallbeispiel 1:

Fallbeispiel 2:

Die 21-jährige Studentin Bianca fühlt sich seit geraumer Zeit müde und nicht mehr so leistungsfähig wie vor einigen Wochen. Zunächst vermutet sie einen Zusammenhang mit der aktuellen Prüfungssituation. Als die Beschwerden jedoch auch nach einiger Zeit nicht besser werden, sucht sie ihren Hausarzt auf.

Bei der Auskultation hört Dr. Meier ein deutliches Geräusch über der Aortenklappe. Die daraufhin durchgeführte Echokardiographie zeigt jedoch unauffällige Befunde. Bei der Bestimmung des kleinen Blutbildes fällt ihm folgender Wert auf: Hb 9,2 g/dl.

Können Sie sich nun erklären, woher das Geräusch über der Aortenklappe stammt? Denken Sie vor allem über die physikalischen Grundlagen zu Flüssigkeiten, laminare und turbulente Strömung, Strömungsgeschwindigkeit und Viskosität nach.

Lösung Fallbeispiel 2:

Station 6: Plethysmographie (Demonstrationsversuch)

Dieser Versuch wird vom Praktikumsleiter in der Großgruppe unter Mithilfe eines Teilnehmers durchgeführt.

Stichworte:

Reaktive Hyperämie, Durchblutungsreserve, Niederdrucksystem, Venenpulskurve, Muskelpumpe, Venenklappen

Grundlagen der reaktiven Hyperämie

Mit der Venenverschlussplethysmographie kann die Durchblutung im Bereich der Extremitäten zum Nachweis von Durchblutungsstörungen gemessen werden. Unter Ruhebedingungen liegt die Durchblutung der Extremitäten im Bereich zwischen 1-4 ml/(100g*min). Sie kann bei Muskelarbeit um ein Vielfaches gesteigert werden.

Messprinzip Venenverschlussplethysmographie

Die Plethysmographie dient der Gefäßdiagnostik und erlaubt Aussagen über die arterielle Durchblutung, die Ruhedurchblutung, die Durchblutungsreserve, venöse Kapazität, venöse Ausstromgeschwindigkeit und über den Zustand der Venenklappen.

Bei der Verschlussplethysmographie wird eine Stauungsmanschette um die Extremität gelegt und auf einen Druck aufgeblasen, der zwischen dem diastolischen und venösen Druck liegt. Der arterielle Blutzufluss kann also weiterhin erfolgen. Der venöse Abfluss wird unterbrochen und das Volumen distal der Stauungsstelle nimmt zu. Diese Volumenzunahme kann mit Dehnungsmessstreifen, die distal der Stauungsmanschette liegen, registriert werden. Das Gerät wandelt die erfassten Messwerte in Durchblutungswerte um. Man erhält eine in drei Abschnitte eingeteilte Kurve, aus der sich arterieller Einstrom, venöse Kapazität und venöser Ausstrom bestimmen lassen.

Das Gerät verfügt über 4 Standardprogamme:

Für den heutigen Versuch werden aber nur folgende zwei Programme benötigt:

Messgröße	Aussage
Arterielle Durchblutungsreserve (Hyperämie)	Therapiewahl und –kontrolle Bestimmung des Schwere- und Kompensationsgrades bei Verschlüssen
Muskelpumpe	Beurteilung der Venenklappe und der hämodynamischen Wirksamkeit von Varizen

Durchführung des Versuchs:

Anlegen der Manschette um den rechten oder linken Oberschenkel und des Dehnungsmessstreifens um die entsprechende Wade.

6a) Messung der Durchblutungsreserve (reaktive Hyperämie nach 3 min Ischämie)

Es wird ein Manschettendruck von 180 mmHg (23 kPa) (ca. 50 mmHg (6,6 kPa) über dem systolischen Druck) und eine Ischämiezeit von 3 min erzeugt. Nach den 3 min wird der Druck schnell abgelassen und die reaktive Hyperämie im Abstand von 10 s gemessen.

Kleben Sie hier Verlauf der Beindurchblutung vor, während und nach Einsatz der reaktiven Hyperämie ein.

Dauer der reaktiven Hyperämie:_____

6b) Funktionstest für die Venenklappen und Varizen (Muskelpumpe)

Der Proband steht. Die Messfühler werden um die Wade gelegt. Der Proband führt 12 Zehenstände nach Metronomschlag aus und bleibt dann wieder ruhig stehen.

Kleben Sie hier eine Registrierung der Muskelpumpentätigkeit ein.

Bewertungen der plethysmographischen Messergebnisse, Wade (ml/100 ml Gewebe) / min

Spitzenwert der reaktiven Hyperämie	
18	normal
12	leichte Durchblutungsstörung Raucher
8	mittelschwere Durchblutungsstörung
4	schwere Durchblutungsstörung

Abschließend beantworten Sie bitte folgende Fragen stichpunktartig

1. Welche Bedingungen führen zu einer reaktiven Hyperämie?

2. Welche Mechanismen bewirken den venösen Rückstrom des Blutes?
   Erläutern Sie die einzelnen Aspekte.

3. Wie sieht der Venenpuls aus und wodurch kommt er zustande? Welchen Einfluss hat eine Sympathikusaktivierung auf den Verlauf des Venenpulses?

Platz für Notizen

ANHANG B

Allgemeine Registriermethodik

Linearität und Bandbreite von Verstärkern und Registriergeräten

Zum Registrieren von biophysikalischen Vorgängen werden im Praktikum Schreiber und Oszillographen mit elektrischen Verstärkern eingesetzt. Sie sind in der Lage, eine am Eingang anliegende Spannungszeitfunktion zu verstärken und dann in eine entsprechende Auslenkung des Schreibhebels auf dem Papier bzw. des Elektronenstrahls auf dem Oszillographenschirm - also wieder in eine Amplituden-Zeit-Funktion - umzusetzen. Zur Beurteilung der Güte dieses Vorgangs dient der Begriff Linearität. Ein System heißt linear, wenn eine sinusförmige Schwingung konstanter Amplitude am Eingang eine sinusförmige Schwingung gleicher Frequenz und ebenfalls konstanter Amplitude am Ausgang bewirkt und mehrere derartige Schwingungen sich im System additiv überlagern.

Reale Verstärker und Registriersysteme sind nur innerhalb bestimmter Frequenzgrenzen linear. Werden diese Grenzen über- bzw. unterschritten, so arbeitet das betreffende Gerät nichtlinear, d. h. die zuvor genannten Voraussetzungen für eine korrekte Registrierung sind nicht mehr gegeben. Das Registriergerät zeigt dann einen Wert an, der der zu messenden Größe nicht mehr proportional ist. Man nennt den Frequenzbereich eines Systems, innerhalb dessen Linearität vorliegt, seine "Bandbreite". Da sich in der Regel die Abweichung von der Linearität stufenlos verändert, hat man willkürlich definiert, dass die Grenzen der Bandbreite dort festzusetzen sind, wo bei gleicher Höhe des Eingangssignals die Amplitude des angezeigten Wertes um 30 % (3 dB) abgenommen hat.

Die Abhängigkeit der registrierten Amplitude von der Frequenz des Signals lässt sich in einem Diagramm als "Amplituden-Frequenzgang" darstellen.

Nach dem Bild des Frequenzganges kann man fast alle realen Systeme in 3 Klassen einteilen:

Tiefpass-Systeme

Hochpass-Systeme

Bandpass-Systeme

Tiefpass-Systeme lassen nur niedrige Frequenzen (Gleichspannung bis langsame Änderungen des Signals) durch, bei schnellen Änderungen können sie nicht mehr folgen.

Hochpass-Systeme lassen nur hohe Frequenzen (schnelle Änderungen des Signals) durch. Sie blockieren langsame Veränderungen oder gar Konstantwerte eines Signals.

Bandpass-Systeme lassen nur Frequenzen innerhalb einer bestimmten Bandbreite durch. Schnellere oder langsamere Signaländerungen werden nur abgeschwächt registriert.

Generell gilt: Nur ein Signal, dessen Frequenzspektrum in die Bandbreite des Systems fällt und dessen Amplitude seinen Aussteuerungsbereich nicht überschreitet, kann mit seiner Hilfe verzerrungsfrei aufgezeichnet werden.

Schreiber besitzen je nach dem verwendeten Schreibsystem (Thermoschreiber, Tintenschreiber, UV-Licht-Schreiber) Bandbreiten von 0 Hz = Gleichspannung bis etwa 50 - 100 Hz (Direktschreiber), evtl. bis über 1000 Hz (UV-Schreiber). Sie sind also in der Regel Tiefpass-Systeme.

Oszillographen besitzen demgegenüber - aufgrund der Trägheitslosigkeit ihres "Schreibhebels", des Elektronenstrahls - je nach den Eigenschaften ihrer Verstärker Bandbreiten von 0 Hz bis in den Mega- oder Gigahertz-Bereich. Sie sind die universalen Breitbandregistriersysteme.

Elektrische Bandspeicher für Messdaten können Signale von 0 Hz bis weit über 100 kHz registrieren (demgegenüber registrieren Audio-Recorder, z. B. die üblichen Hifi-Kassettenrecorder, nur Signale von ca. 30 Hz bis etwa 18 - 20 kHz, stellen demnach relativ enge Bandpass-Systeme dar).

Frequenztransformation von Signalen

Signale, deren Bandbreite nicht mit derjenigen eines Registriersystems übereinstimmt, können u. U. dennoch von diesem registriert werden, wenn man durch zeitliche Raffung bzw. Dehnung des Signals dessen Bandbreite um den entsprechenden Faktor zu höheren bzw. niedrigeren Frequenzen verschiebt. So können z. B. Neurogramme noch auf manchen Schreibern dargestellt werden, wenn man sie zunächst in der ursprünglichen Bandbreite auf einem elektrischen Bandspeicher registriert und dann diese Registrierung mit 32- bis 128-fach untersetzter Geschwindigkeit auf den Schreiber überspielt.

Filterung von Signalen

Filter finden bei der Darstellung und Verarbeitung von biomedizinischen Signalen vielfältige Verwendung. So können z. B. niederfrequente Nutzsignale durch Tiefpassfilter vom höherfrequenten Rauschen, höherfrequente Nutzsignale durch Hochpassfilter von niederfrequenten Störungen befreit und dadurch besser dargestellt werden. In analoger Weise lassen sich aus einem Gemisch von Signalen mit unterschiedlichen Frequenzspektren durch entsprechende Hochpass- und Tiefpassfilter die Signale voneinander trennen. Durch entsprechende Filterung lassen sich schließlich Gruppen von Frequenzkomponenten eines Signals weitgehend isoliert darstellen, z. B. die Gleichspannungs- und Wechselspannungskomponenten des EEG.

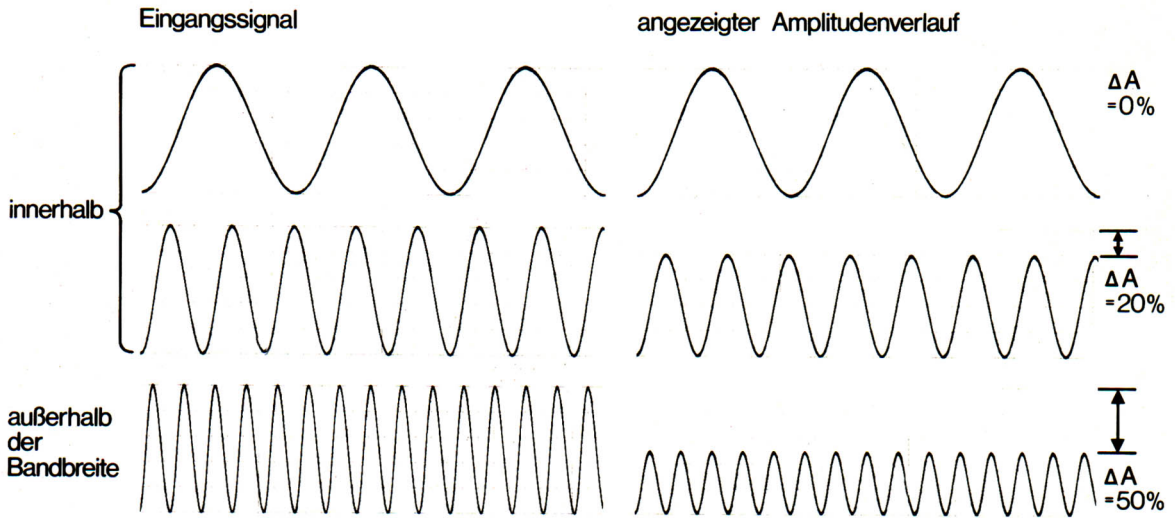


Abb. B.1 Zusammenhang zwischen einem Eingangssignal konstanter Amplitude und zunehmender Frequenz (links) und der Amplitude des Ausgangssignals (rechts) bei einem realen Registriersystem

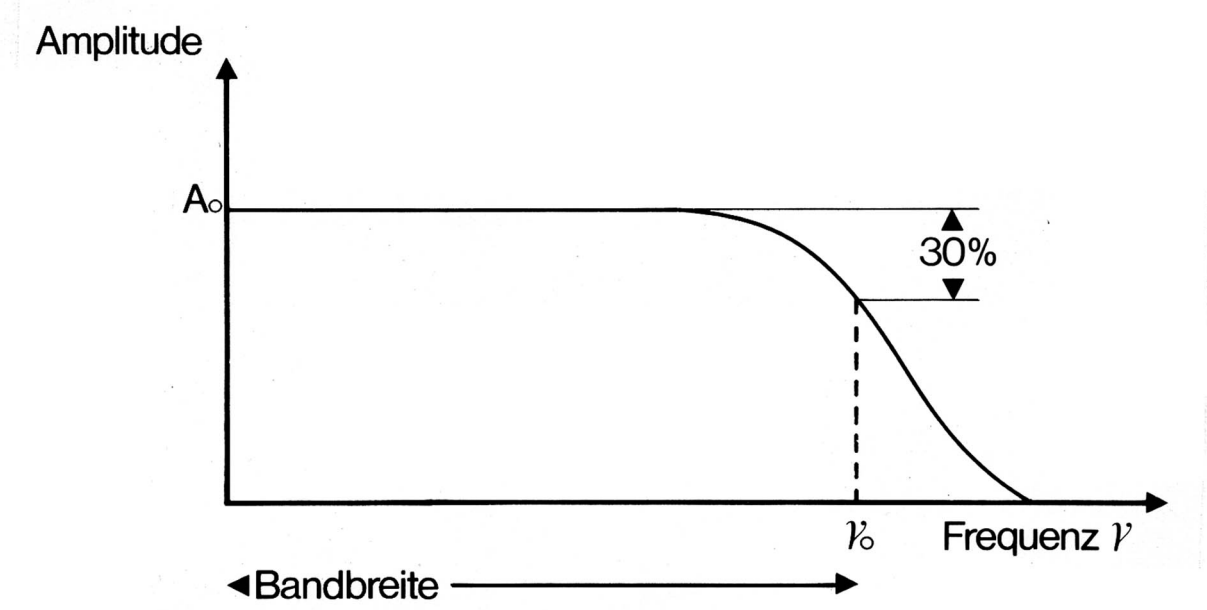


Abb. B.2 Amplituden-Frequenzgang eines realen Registriersystems (z. B. eines Schreibers)

Ao = Ausgangsamplitude, νo = obere Grenzfrequenz

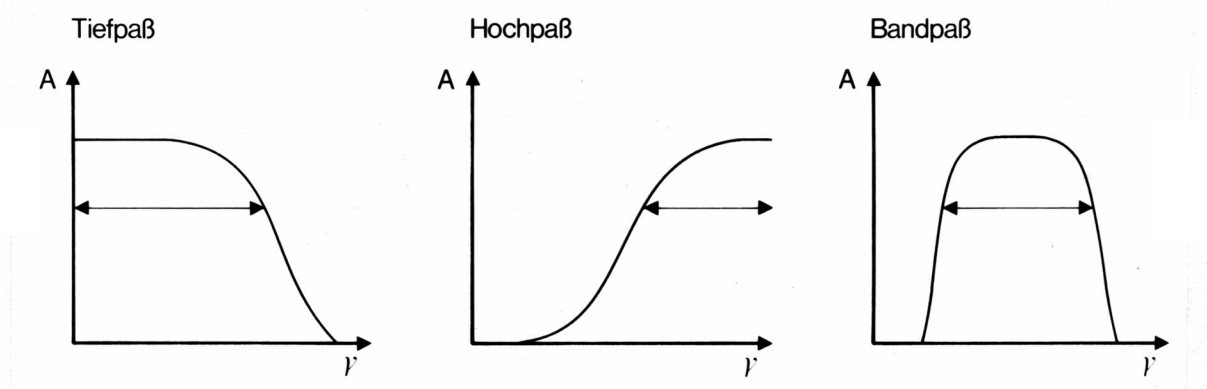


Abb. B.3 Schematischer Amplituden-Frequenzgang eines Tiefpass-, Hochpass- und Bandpass-Systems

A = Amplitude
ν = Frequenz

Arbeitsweise von Oszillographen:

Der Oszillograph ist ein universell einsetzbares Beobachtungs-, Registrier- und Messgerät. An zwei Eingängen, mit x und y bezeichnet, kann er Signale in Form von elektrischen Spannungen (U) aufnehmen. Das Ausgangssignal erscheint auf dem Leuchtschirm als Lichtpunkt, der durch ein Signal U_x horizontal und ein Signal U_y vertikal bewegt wird. Bei den meisten Oszillographen ist eine Zeitbasis vorgesehen, die für die horizontale Bewegung einen periodischen Spannungsanstieg mit darauf folgendem schnellen Spannungsabfall "Kippspannung" (U_k gemäß Abb. B.5) erzeugt. Die Kippspannung - die gleich der horizontal auslenkenden Spannung U_X ist - bewirkt, dass der Kathodenstrahl in einem definierten Zeitintervall von links nach rechts über den Schirm wandert, anschließend sehr schnell zurückspringt und die gleiche Wan-

derung erneut beginnt. Bei den meisten modernen Oszillographen kann der Kippvorgang von unterschiedlichen Eingangssignalen ausgelöst werden (z. B. auch von dem zu registrierenden Signal, das am y-Verstärker anliegt). Diesen Vorgang nennt man Triggern (Auslösen).

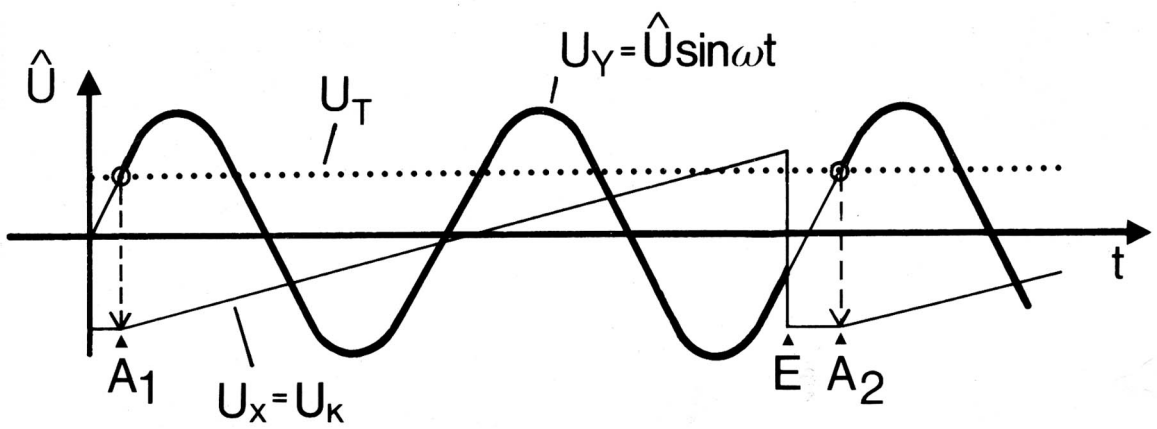


Abb. B.4 Zur Erläuterung des Triggervorgangs

Die Kippspannung (U_k) läuft dann nach dem Zurückspringen nicht sofort wieder los, sondern erst, wenn die Triggerspannung (z. B. die Eingangsspannung U_y des Signals am y-Verstärker) eine bestimmte Schwelle (die "Triggerschwelle", UT) in einer bestimmten Richtung (positive oder negative "Flanke") zur Auslösezeit A_1 überschritten hat. Die Schwelle und die Flanke können eingestellt werden. Entsprechend der Kippspannung (U_k) wird nun der Oszillographenstrahl von links nach rechts über den Schirm bewegt. Dabei wird die Spannungszeitfunktion des Signals auf den y-Eingang ($U_y = \hat{U} \sin \omega t$) sichtbar. Am Ende des Schirms angelangt (E), springt die Kippspannung zurück und läuft erst wieder los, wenn die Triggerbedingungen zur neuen Auslösezeit A_2 wiederum erfüllt sind. Durch das Triggern kann eine Synchronisierung zwischen einer periodischen y-Spannung und der internen x-Ablenkspannung erreicht werden, die bei periodischen Signalen zu einem stehenden Bild auf dem Oszillographen führt.

Falls der Oszillograph nicht automatisch getriggert wird, können nur dann stehende Bilder entstehen, wenn sich die Frequenz der Kippspannung zur Frequenz der periodischen y-Spannung wie 1:1, 1:2, 1:3 etc. oder 2:1, 3:1 etc. verhält. Oszillographen sind wegen der Trägheitslosigkeit des Elektronenstrahls zur Darstellung schneller Vorgänge geeignet; die Bandbreite des im Praktikum verwendeten Systems beträgt z. B. über 1 MHz.

Der Analog-Digital-Umsetzer und das Abtasttheorem

a) Der Analog-Digital-Umsetzer

Um bei der Auswertung von Messdaten, die als Analogsignale vorliegen, die Vorteile der Digitaltechnik nutzen zu können, müssen sie in digitale Form gebracht werden. Das geschieht mit Hilfe von Analog-Digital-Umsetzern (ADU). Die umgekehrte Umsetzungsrichtung wird mit Digital-Analog-Umsetzern (DAU) bewerkstelligt.

Bei der A-D-Umsetzung (oft als Abtastung, engl. to sample, bezeichnet) wird der Bereich, in dem Analogwerte auftreten können, beschränkt und in eine Anzahl - meist gleich großer - Stufen geteilt. Die Anzahl ist gleich der von dem Umsetzer unterscheidbaren Zahlen. So kann z. B. ein Wandler mit 3 Bit die 8 binären Zahlen 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 unterscheiden; dementsprechend wird der Messbereich, in dem Analogwerte auftreten können, in 8 Stufen geteilt. Damit wird allen Analogwer-

ten, die eine kontinuierliche Folge haben können und in eine Stufe fallen, vom ADU der gleiche Zahlenwert zugeordnet. Der ADU ist also unfähig, mit höherer Auflösung als den vorgegebenen Stufen, Eingangsspannungsänderungen zu erfassen und zu verarbeiten. Er hat einen Quantisierungsfehler, der mit der Erhöhung der Stufenzahl abnimmt. Allerdings muss dann auch der verfügbare Digitalumfang erhöht werden. So kann z. B. ein ADU mit 8 bit 256 binäre Zahlen unterscheiden und damit ebensoviele Stufen im Analogbereich verarbeiten; ein 10-bit-ADU sogar 1024 Zahlen und Stufen.

Durch die Vergrößerung der Stufenzahl wird die Auflösung eines ADU erhöht. Die Auflösung ist definiert als Quotient aus Eingangsspannungsbereich und Anzahl der Stufen.

Bei einem ADU ist von dem Begriff der Auflösung der der Genauigkeit zu unterscheiden. Unter Genauigkeit versteht man die Fähigkeit eines ADU, einer bestimmten Eingangsspannung einen bestimmten Zahlenwert zuzuordnen. Die Genauigkeit eines Umsetzers hängt davon ab, dass sich die zu messende Analogspannung während des Abtastvorgangs möglichst nicht oder nur sehr wenig ändert. Als Richtwert für eine solche zulässige Spannungsänderung gilt die Beziehung

$$f \leq (2 \cdot \pi \cdot 2^{N+1} \cdot T_s)^{-1}$$

(f = Frequenz der zu messenden Analogspannung,
T_s = Dauer der Abtastung, N = Auflösung)

Bei gegebener Abtastdauer ist demnach die noch messbare Signalfrequenz um so geringer, je höher die Genauigkeit ist. Hochauflösende ADUs mit großer Genauigkeit sind für die Umsetzung relativ niederfrequenter Signale geeignet. Es müssen also jeweils entsprechende Kompromisse geschlossen werden.

b) Das Abtasttheorem

Ein analoges Signal mit seiner zeitlich kontinuierlichen Folge von Messwerten muss für seine volle digitale Entsprechung von einem ADU eigentlich unendlich häufig abgetastet werden. Da aber - wie im Abschnitt zur Fourieranalyse ausgeführt - die hochfrequenten Komponenten eines Signals wegen der Kleinheit ihrer Amplituden bei Untersuchungen ohne großen Fehler unberücksichtigt bleiben können, kann das Spektrum eines Signals für praktische Analyse- und Synthesezwecke auf ein bestimmtes Frequenzband beschränkt werden. Für derartige frequenzbandbeschränkte Signale genügt eine endlichhäufige Abtastung, um ihre digitale Entsprechung zu erhalten.

Wenn bei einem frequenzbandbeschränkten Signal die Abtastfrequenz größer gewählt wird als das Doppelte der höchsten Frequenzkomponente des Signals, können aus den Abtastwerten die Fourierkoeffizienten des Signals eindeutig ermittelt werden, und folglich kann das Signal daraus eindeutig rekonstruiert werden. Die Reihe der Abtastwerte bildet dann die digitale Entsprechung des Analogsignals.

Die mathematische Formulierung dieses Zusammenhanges lautet

$$f_s = \frac{1}{T_s} > 2\ f_{max}$$

(f_s = Abtast(sample)frequenz, T_s = Abtastintervall, f_{max} = höchste Frequenzkomponente des Signals)

Wird die Abtastfrequenz kleiner gewählt, als es der obigen Bedingung entspricht, ist die eindeutige Rekonstruktion des Signals nicht möglich. Dieser Effekt wird als Aliasing bezeichnet.

c) Wiedergabe digitalisierter Signale auf dem Bildschirm

Da nach Digitalisierung analoger Kurven Messwerte nur für eine (von der Abtastfrequenz festgelegte) Folge einzelner Zeitpunkte vorliegen, ergibt die Wiedergabe nach Digitalisierung - falls nicht durch Interpolation zwischen den Koordinatenpunkten eine "Glättung" vorgenommen wird - grundsätzlich eine Stufenform (Treppenkurve). Die Größe der einzelnen Stufen hängt zum einen von der Auflösung des ADU, zum anderen von der Steilheit der Änderung der Signalgröße zwischen den jeweiligen Messpunkten ab. In der Signalsammlung für die Fourieranalyse und Frequenzspektrographie sind diese Stufen bei schnellen Kurvenverläufen (Aktionspotential) deutlich zu sehen.

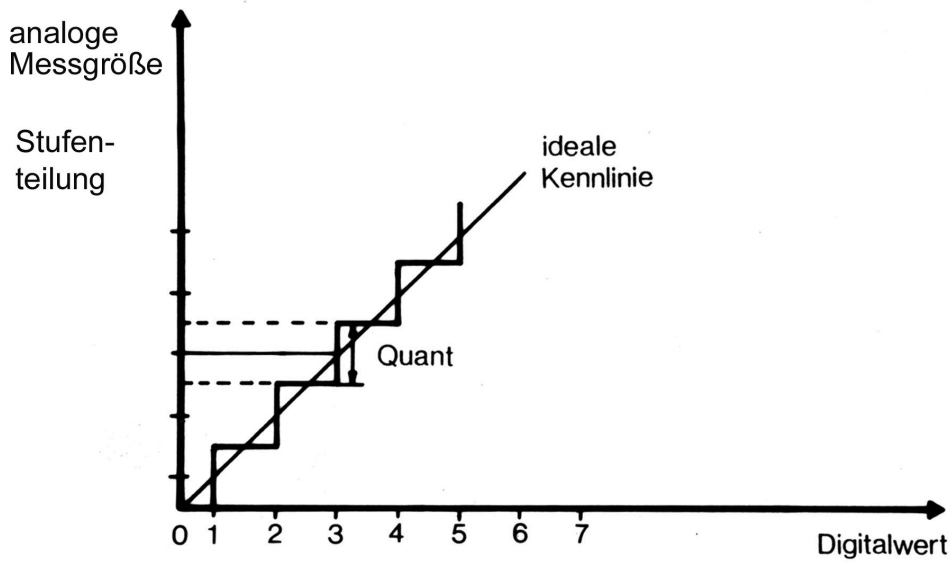


Abb. B.5 Kennlinie eines Analog-Digital-Umsetzers. Quant = Amplitudenbereich, der einem Zahlenwert zugeordnet wird. Durch Wahl ungleichmäßig großer Quanten können verschiedene Krümmungen der Kennlinie erreicht werden.

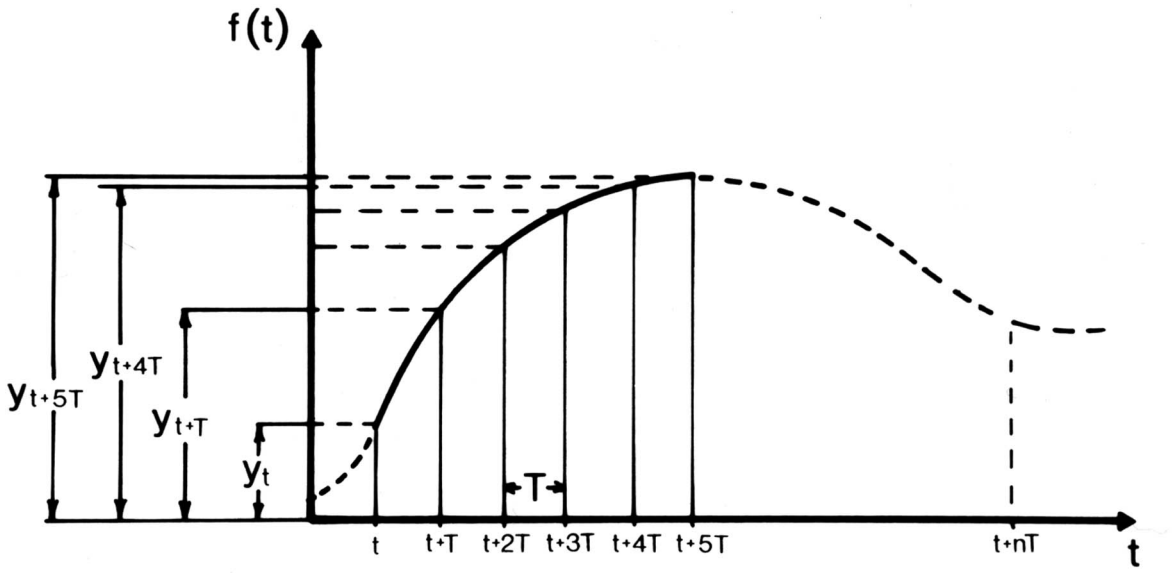


Abb. B.6 Abtastungen eines Analogsignals zu äquidistanten Zeitpunkten im Abstand T. Die Abtastfrequenz 1/T muss der Bedingung $1/T > 2f_{max}$ genügen (f_{max} = Frequenz der höchsten Frequenzkomponente des Signals).

ANHANG C

Allgemeine Eigenschaften biologischer Signale

Viele physiologische Vorgänge lassen sich quantitativ als zeitliche Änderung bestimmter Größen - wie Stoffkonzentration, Flussgeschwindigkeit, Druck, elektrisches Potential - beschreiben und messen. Die Messung erfolgt in der Regel in der Weise, dass die betreffende Größe durch einen Messwertumwandler in ein elektrisches Signal überführt, das heißt die Zeitfunktion der betreffenden Größe als Zeitfunktion einer elektrischen Spannung abgebildet wird (wobei primäre elektrische Größen, wie Membranpotentiale, nicht mehr gewandelt, sondern nur noch verstärkt werden müssen). Diese Überführung in elektrische Signale bietet die Vorteile der leichten Registrierbarkeit, Speicherbarkeit und Auswertbarkeit (z. B. durch Computer) dieser Messwerte.

Auftretenshäufigkeit

Viele biomedizinische Signale haben, entsprechend den zugrunde liegenden Funktionsabläufen, periodischen Charakter: Atemstrom, Pulskurve des Blutdrucks, EKG, EEG, Aktionspotentiale von Nerven und Muskeln. Die Auftretenshäufigkeit (als Kehrwert der Periodendauer auch "Rate" genannt, z. B. Pulsrate, Potentialrate) wird im allgemeinen Sprachgebrauch meist als "Frequenz" bezeichnet (Atemfrequenz, Pulsfrequenz, Potentialfrequenz usw.). Die einzelnen Signale einer Signalfolge gehen dabei häufig nicht kontinuierlich ineinander über (z. B. Aktionspotentiale), sondern sind durch mehr oder minder längere Intervalle getrennt. Auch diese Signale stellen jedoch meist komplexe Formen dar, die sich als Überlagerung von Wellen verschiedener Frequenzen auffassen lassen. Die Summe dieser Frequenzkomponenten, d. h. das Frequenzspektrum solcher Signale, bedingt die Bandbreite des betreffenden Signals; diese ist wichtig für dessen unverzerrte Registrierung (s. u.). Wählt man bei seiner Bestimmung mittels Fourier-Analyse als Basis für die Grundfrequenz das Intervall zwischen aufeinander folgenden Signalen, so erscheint die Auftretenshäufigkeit des Signals im Spektrum als Grundfrequenz. Im Vordergrund des Interesses steht jedoch bei Signalen wie den oben genannten in der Regel die Auftretenshäufigkeit.

Frequenzspektrum

Die "Frequenz" als Auftretenshäufigkeit des Ablaufs eines - einfachen oder zusammengesetzten - Signals ist infolgedessen zu unterscheiden von seinem Frequenzspektrum, d. h. der Gesamtheit aller die Signalgestalt bestimmenden Teilfrequenzen mit ihren zugehörigen Amplitudenanteilen. Die Übergänge sind jedoch in Abhängigkeit von der Verlaufscharakteristik der Signale fließend: Im Extremfall der Überlagerung kontinuierlicher harmonischer (Sinus-)Schwingungen enthält z. B. das Fourier-Spektrum lediglich die Frequenzen (hier: Auftretenshäufigkeiten) der Einzelsignale (f_2, f_1, usw.) wie des daraus resultierenden Gesamtsignals (f_G, als Grundfrequenz der periodischen Gesamtschwingung). Der Frequenzbereich, in dem das Signal mit seinen gesamten Frequenzanteilen vertreten ist, wird als die Bandbreite des Signals bezeichnet. Die Bandbreite und die Verteilung der Energieanteile auf die einzelnen Teilfrequenzen (u. U. mit mehreren Maxima und Minima) sind je nach der Art des Signals verschieden. Die Begriffe "Frequenz" (als Ereignishäufigkeit) und "Frequenzspektrum" entsprechen sich daher nur bei sinusförmigen, kontinuierlichen Schwingungen, nicht aber bei den meisten biomedizinischen Signalen: So enthält z. B. das Frequenzspektrum des Amplitudenzeitgangs eines Nervenaktionspotentials je nach Typ der Nervenfaser und den Ableitungsbedingungen Frequenzkomponenten von wenigen Hz (langsame Nachpotentiale) bis ca. 6 kHz (steile Anstiegsflanke des Aktionspotentials), die Bandbreite von arteriellen Druckpulsen erstreckt sich bis ca. 100 Hz, von Atemstromkurven bis ca. 10 Hz, während die Ereignishäufigkeit dieser Vorgänge (die "Aktionspotentialfrequenz", "Herzfrequenz", "Atemfrequenz") wesentlich geringer ist (s. u. die betreffenden Signalbeispiele im Zusammenhang mit der Frequenzspektrographie und Fourier-Analyse). Komplex zusammenge-

setzte Signale, bei denen das Frequenzspektrum besonders interessiert, sind typischerweise Sprachlaute (als Überlagerungen kontinuierlicher, z. T. weitgehend harmonischer Schallschwingungen, s. Praktikumsversuch 2) und EEG (als Überlagerung mehr oder weniger kontinuierlicher, nicht harmonischer Potentialwellen, s. Praktikumsversuch 1). Die übliche EEG-Analyse ermittelt jedoch nicht das Frequenzspektrum im Sinne der Fourier-Analyse oder Frequenzspektrographie, sondern die komplexeren Beziehungen zwischen Form, Frequenzbereich, Amplitude und Häufigkeitssverteilung dieser Wellen.

Bestimmung des Frequenzspektrums

Das Frequenzspektrum biomedizinischer Signale lässt sich - wie auch bei beliebigen anderen Signalen - messen. Im Prinzip beruht diese Messung darauf, dass jeder periodische Vorgang als eine Summe von Sinusschwingungen aufgefasst werden kann. Mit dem Rechenverfahren der Fourier-Analyse (nach dem Mathematiker J.-B. Fourier) lässt sich diese Zusammensetzung aus Sinusschwingungen verschiedener Frequenz mathematisch exakt formulieren. Für Routinemessungen, wie sie in der akustischen Schallanalyse durchgeführt werden, setzt man in der Regel einfachere apparative Verfahren (Frequenzanalysatoren, -spektrographen) ein. Die wichtigsten sind die Frequenzspektrographie (mit dem Frequenzspektrometer), bei der Frequenzspektren erstellt, sowie die Oktavsieboszillographie (mit dem Oktavsieboszillograph, s. Versuch 2), bei der Frequenzbänder kontinuierlich als Zeitfunktion dargestellt werden.

Die Fourier-Analyse

Nach einem mathematischen Verfahren, das von Fourier entwickelt wurde, ist es möglich, periodische Funktionen mit bestimmten Eigenschaften durch eine trigonometrische Reihe zu approximieren. D. h., eine Funktion f(t) kann mit Hilfe der Superposition von zeitlichen Sinus- und Cosinusfunktionen verschiedener Frequenz und Amplitude in ihrer zeitlichen Verlaufsform nachgebildet werden. Die Güte der Übereinstimmung hängt von der Anzahl der superponierten trigonometrischen Funktionen ab. Für die vollkommene Übereinstimmung sind theoretisch unendlich viele derartige Funktionen notwendig.

Die Periodizität einer Funktion besagt, dass es eine von 0 verschiedene Konstante T gibt, für die gilt:

$$f(t + T) = f(t)$$

Die Funktion muss also in einem gewissen zeitlichen Abstand T, der Periodendauer, die gleiche Folge von Ordinatenwerten erneut durchlaufen. Für die Durchführung der Fourier-Analyse ist es daher notwendig, die Frequenzen und Amplituden der zu überlagernden Wellen zu bestimmen.

Zur Bestimmung der Frequenzen wird folgendermaßen vorgegangen: Aus allen möglichen denkbaren Frequenzen werden nur die ganzzahligen Vielfachen einer als Grundfrequenz bezeichneten Frequenz benötigt. Liegt eine Funktion f(t) vor, so muss an ihr die Periodendauer T bestimmt werden (der zeitliche Abstand zweier Punkte in gleicher Phase). Die mit dieser Dauer korrelierende Frequenz ($f = T^{-1}$) ist die gesuchte Grundfrequenz; alle anderen Frequenzen bestimmen sich damit von selbst.

Die Bestimmung der Amplituden geschieht folgendermaßen: Zunächst werden die Fourierkoeffizienten der Glieder der trigonometrischen Reihe bestimmt. Dies geschieht mit Hilfe der sogenannten Euler-Fourierschen-Integrale, was aber heute schon mit etwas aufwendigeren Taschenrechnern und entsprechenden Programmen möglich ist. Als Wurzel aus der Summe der Quadrate der Koeffizienten von Sinus- und Cosinus-Funktionen jeweils gleicher Frequenz wird die Amplitude der jeweiligen Sinuswelle bestimmt.

Die Amplitudenwerte der für die Approximation einer gegebenen Funktion notwendigen Sinuswellen in Abhängigkeit der Frequenz wird als Spektrum des Signals, die Darstellung einer Amplitude als Spektrallinie, die Sinuswelle als Frequenzkomponente bezeichnet. Die Darstellung des Spektrums geschieht meist auf folgende Weise: Alle Amplituden der ermittelten Spektrallinien werden addiert. Jede einzelne Linie wird dann in ihrer Länge als prozentualer Anteil an dieser Summe im Spektrum ausgegeben.

Bei der Durchführung der Fourier-Analyse treten im wesentlichen zwei Schwierigkeiten auf. Meist wird eine Zeitfunktion gemessen und liegt dementsprechend als Registrierung und nicht als mathematisch formulierte Funktion vor. Weiterhin ist es nicht möglich, unendlich viele Koeffizienten zu berechnen. Für die reale Durchführung werden daher folgende Einschränkungen gemacht: Da meist die Amplituden der hochfrequenten Komponenten verschwindend geringe Beträge aufweisen, können alle Komponenten oberhalb einer bestimmten Frequenz ohne großen Approximationsfehler weggelassen werden. Eine Fouriersynthese - die Durchführung der Superposition der ausgewählten Frequenzkomponenten - und ein Vergleich mit der untersuchten Funktion gibt Auskunft über die Güte der durchgeführten Approximation.

Die benötigten Koeffizienten können mit entsprechenden Rechenverfahren aus äquidistanten Ordinatenwerten innerhalb einer Periode der registrierten Funktion ermittelt werden. Jedoch ist ihre Anzahl von der Dichte der benutzten Ordinatenwerte innerhalb der Periode abhängig. In der heutigen, durch die elektronische Datenverarbeitung unterstützte Auswerttechnik, wird ein zu untersuchendes Signal mit Hilfe eines Analog-Digital-Umsetzers in einen Computer eingelesen. Dabei werden die benötigten äquidistanten Ordinatenwerte automatisch ermittelt und können der Analyse gemäß verarbeitet werden. Die oben eingeführte Einschränkung auf periodische Funktionen kann für viele Anwendungen der Ergebnisse der Fourier-Analyse fallengelassen werden. Ein einmaliges Ereignis, das theoretisch mit Fourierschen Integralen transformiert werden muss, wird daher in der Praxis oft als periodisch fortsetzbar betrachtet und entsprechend ausgewertet. Die Umhüllende der sich dabei ergebenden Spektrallinien ist vergleichbar mit der sich bei der Durchführung der Fouriertransformation ergebenden Funktion.

Die Amplitudenwerte solcher Spektrogramme werden primär üblicherweise nicht in absoluten, sondern in relativen Einheiten (sogenannte Pegelwerte) angegeben als Verhältnis der Eingangsspannung des elektrischen Signals am Analysator (U_{ein}) zu einem festen Bezugswert (U_0 = Spannungswert des Rauschens des jeweiligen Datenträgers, z. B. Magnetband), ausgedrückt in Dezibel.

Gemäß der Definition

$$\text{Spannungsverhältnis} = 20 \log_{10} \frac{U_{ein}}{U_0} \quad [\text{Dezibel}]$$

entspricht daher ein Amplitudenwert von 10 dB etwa dem dreifachen, von 20 dB dem 10-fachen, von 30 dB etwa dem 30-fachen, von 40 dB dem 100-fachen, von 60 dB dem 1000-fachen der Bezugsspannung.

Bei den im Praktikum gezeigten Frequenzspektren wurden diese Amplitudenwerte dann als Anteil (%) an der gesamten Amplitudensumme des Spektrogramms ausgedrückt; so sind sie in den Diagrammen (auch denen der Fourier-Analyse) dargestellt.

Störungen

Bei Übertragungs- und Registriervorgängen treten neben dem erwünschten Signal (Nutzsignal) auch unerwünschte Signale auf, die Störungen. Solche Störungen können einmal in Verzerrungen des Nutzsignals bestehen und sind dann in typischer Weise an den Amplituden-Zeit-Verlauf des Nutzsignals gekoppelt (sogenannte signalkohärente Störungen). Sie können aber auch dadurch zustande kommen, dass Nutzsignale aus anderen Kanälen eingestreut werden (Nebensprechen, allgemein bekannt aus dem Rundfunkempfang). Störungen, die von keinem Nutzsignal abhängen, sondern durch zufällige Zeitprozesse in den signalgebenden und –übertragenden Teilen des Systems entstehen, werden "Rauschen" genannt. Ist die Leistungsspektraldichte dieser (statistisch definierten) Störungen über den in Frage kommenden Frequenzbereich gleich verteilt, so spricht man von "weißem Rauschen", variiert sie in Abhängigkeit von der Frequenz, so spricht man (in Analogie zur Lichtstrahlung) vom "farbigen Rauschen". Ein Signal kann von realen Systemen nur näherungsweise rein übertragen werden; grundsätzlich sind hier den Signalen immer Störungen beigemischt (vgl. das Hintergrundrauschen beim Radioempfang, Bandrauschen bei der Tonkassette). Die Güte der Übertragung lässt sich dementsprechend als Amplitudenverhältnis von Signal und Störung messen (Störpegel, Rauschpegel, Signal-Rausch-Abstand).